

Illustrative Informationsvisualisierung

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
der Universität Rostock



vorgelegt von
Martin Luboschik

wohnhaft in Rostock
Rostock, 2. November 2013

Betreuer

- ▷ *Prof. Dr.-Ing. habil. Heidrun Schumann*
Universität Rostock, Deutschland

Externe Gutachter

- ▷ *Dr.-Ing. Tobias Isenberg, Directeur de Recherche*
INRIA, Université Paris-Sud, Frankreich
- ▷ *Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Schlechtweg-Dorendorf*
Hochschule Anhalt, Deutschland

Datum der Verteidigung

- ▷ *16.04.2014*

Schlagwörter

Illustrative Visualisierung, Informationsvisualisierung, Nicht-photorealistisches Rendering, Akzentuierung und Deakzentuierung, Stile, Beschriftungen, Überlagerungsreduktion.

Keywords

Illustrative Visualization, Information Visualization, Non-photorealistic Rendering, Accentuation and De-Accentuation, Rendering Styles, Labeling, Overplotting Reduction.

Klassifikation / Classification (ACM CCS 2012)

Human-centered computing → Information visualization, Computing methodologies → Non-photorealistic rendering, Human-centered computing → Visualization theory, concepts and paradigms.

Copyright © 2013 by Martin Luboschik

Kurzfassung Die Informationsvisualisierung ist ein wichtiger Ansatz zur Analyse großer Datenmengen. Mit wachsendem Umfang und wachsender Komplexität der Daten wird es jedoch zunehmend schwerer, die hierbei eingesetzte visuelle Repräsentation zu interpretieren und die für einen Nutzer relevanten Informationen adäquat darzustellen.

Die Illustration, eine konkrete Anwendung des Nicht-photorealistischen Renderings, beschäftigt sich bereits seit längerer Zeit mit der verbesserten Kommunikation wichtiger Bildinformationen. Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, illustrative Verfahren in Techniken der Informationsvisualisierung zu integrieren. Zu diesem Zweck werden beide Bereiche systematisiert und eine theoretische Grundlage für ihre Verknüpfung, nämlich für eine *illustrative Informationsvisualisierung* geschaffen. Auf dieser Basis werden wichtige illustrative Ansätze, konkret Halbtonverfahren, Explosionszeichnungen, Phantomzeichnungen, Schraffuren, Punktzeichnungen, Halos, Aquarelle, Strokes und Beschriftungsmethoden, für unterschiedliche Verfahren der Informationsvisualisierung angepasst, weiterentwickelt und an konkreten Problemstellungen demonstriert. Mit den entwickelten Lösungsansätzen gelingt es, die Kommunikation der dargestellten Informationen zu verbessern.

Abstract Information visualization is an important approach to analyze large mounds of data. But due to their increasing size and complexity it becomes harder to interpret the provided visual representations. In addition it becomes difficult to present the information appropriately, that is specifically important for the user.

For some time, illustration, which is an application of non-photorealistic rendering, deals with an enhanced communication of important image information. It is the objective of the present work to integrate such illustrative approaches into visualization techniques used in information visualization. For this purpose, both fields are systemized and a theoretical foundation of their concatenation – an *illustrative information visualization* – is created. Based on the resulting theoretical model, important illustrative approaches are adapted and enhanced to fit different information visualization techniques. Moreover, they are demonstrated by applying them to specific problems. The examined illustrative techniques are halftoning, exploded views, ghosted views, hatching, stippling, haloing, watercolor simulation, strokes and labeling methods. The according illustrative approaches developed within this thesis enhance the communication of depicted information within different visualization techniques of information visualization.

Danksagung An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich über Jahre hinweg bei der Anfertigung dieser Dissertation unterstützt haben. Dieser Dank gilt an erster Stelle Professorin Heidrun Schumann, die mir in allen Unwegsamkeiten dieser Arbeit mit entsprechendem Rat, konstruktiver Kritik und vor allem viel Geduld den Weg gewiesen hat. Ebenso danke ich Professor Stefan Schlechtweg-Dorendorf und Dr.-Ing. Tobias Isenberg für die bereitwillige Übernahme der Gutachten, sowie ihre inspirierenden Arbeiten im Bereich des Nicht-photorealistischen Renderings. Ganz besonders möchte ich mich bei meinen langjährigen Kollegen Dr.-Ing. Christian Tominski für seine unerbittliche Motivation und alternativen Sichtweisen und Dr.-Ing. Hilko Coords für spannende und abendfüllende Diskussionen bedanken.

Darüber hinaus danke ich den Arbeitsgruppen an den Lehrstühlen für Computergrafik und Visual Computing der Universität Rostock, insbesondere Falko Löffler, Dr.-Ing. Hans-Jörg Schulz, Axel Radloff, Steffen Hadlak, Stefan Gladisch, Malte Willert und Stephan Ohl, für den allzeit offenen Austausch über zu lösende Problemstellungen und konkrete Verbesserungsvorschläge in Bezug auf Implementierungen und Formulierungen. Besonderer Dank gilt auch meiner wissenschaftlichen Hilfskraft Martin Röhlig, der mir durch sein selbstständiges und zügiges Arbeiten zusätzlichen Freiraum für meine Ideen und diese Dissertation geschaffen hat.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie, die mich mit viel Verständnis, spontanen Hilfestellungen aber auch viel Motivation durch diese Zeit begleitet hat. Liebe Kinder, ich danke Euch dafür, dass Ihr immer wieder gemeinsame Zeit mit mir eingefordert habt! Nanette, danke für Dein strapazierbares Durchhaltevermögen, Dein offenes Ohr und Deine wertvolle Unterstützung wenn es wiedermal knapp wurde.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Stand der Forschung	7
2.1. Informationsvisualisierung	7
2.1.1. Begriffsklärung	7
2.1.2. Das Data-State-Referenzmodell	8
2.1.3. Visuelle Variablen und visuelle Repräsentanten	9
2.1.4. Gütekriterien und Visual Clutter	10
2.1.5. Interaktion	12
2.2. Nicht-photorealistisches Rendering	14
2.2.1. Begriffsklärung	14
2.2.2. Abstraktion als illustratorisches Prinzip	16
2.2.3. Verfahren des Nicht-photorealistischen Renderings	17
2.3. Illustrative Visualisierung	26
2.3.1. Begriffsklärung	26
2.3.2. Methoden zur Bestimmung der relevanten Daten	27
2.3.3. Volumendaten	28
2.3.4. Strömungsdaten	30
2.3.5. Abstrakte Daten	31
2.4. Zusammenfassung	33
3. Zusammenführung des NPRs und der Informationsvisualisierung	35
3.1. Konzeptuelle Untersuchung	35
3.1.1. Vorbetrachtung	37
3.1.2. Bildmanipulationen	38
3.1.3. Zusätzliche Grafikprimitive	42
3.1.4. Modellmanipulationen	46
3.1.5. Zusätzliche Transformationen	50
3.1.6. Zusammenfassung	51
3.2. Das erweiterte Data-State-Referenzmodell	53
3.2.1. Transformation: Zusätzliche Grafikprimitive \Rightarrow Bild	53
3.2.2. Transformation: Bild \Rightarrow Zusätzliche Grafikprimitive	55
3.2.3. Transformation: Bild \Rightarrow Geometrisches Modell	55
3.3. Zusammenfassung	56

4. Bildmanipulationen auf der Ebene der visuellen Repräsentation	59
4.1. Überblick	59
4.2. Anwendung von Bildmanipulationsverfahren	60
4.2.1. Hervorhebung relevanter Informationen durch Halos	60
4.2.2. Visuelle Trennung durch Anwendung verschiedener Stile	62
4.2.3. Visualisierung von Unsicherheiten mit Bildmanipulationsparametern	64
4.3. Neue Weaving-Verfahren zur Behandlung von Überlagerungen	66
4.3.1. Problemstellung	66
4.3.2. Lösungsansatz	66
4.3.3. Umsetzung und Diskussion	67
4.4. Diskussion	72
4.4.1. Einordnung in das erweiterte Data-State-Referenzmodell	72
4.4.2. Ergebnisse und Zusammenfassung	74
5. Zusätzliche Grafikprimitive auf der Ebene der visuellen Abstraktion	75
5.1. Überblick	75
5.2. Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive	76
5.2.1. Visualisierung von Unsicherheiten mit Strokes	76
5.2.2. Überlagerungsfreie lokale Beschriftung	78
5.2.3. Zeitlich kohärente Beschriftung	80
5.3. Überlagerungsfreie globale Beschriftung	82
5.3.1. Problemstellung	82
5.3.2. Lösungsansatz	83
5.3.3. Umsetzung und Diskussion	84
5.4. Diskussion	90
5.4.1. Einordnung in das erweiterte Data-State-Referenzmodell	90
5.4.2. Ergebnisse und Zusammenfassung	90
6. Modellmanipulationen auf der Ebene der visuellen Abstraktion	93
6.1. Überblick	93
6.2. Phantomzeichnungen	94
6.2.1. Problemstellung	94
6.2.2. Lösungsansatz	94
6.2.3. Umsetzung und Diskussion	95
6.3. Explosionszeichnungen	99
6.3.1. Problemstellung	99
6.3.2. Lösungsansatz	100
6.3.3. Umsetzung und Diskussion	101
6.4. Diskussion	109
6.4.1. Einordnung in das erweiterte Data-State-Referenzmodell	109
6.4.2. Ergebnisse und Zusammenfassung	110
7. Zusammenfassung	113

II. Dissertationsrelevante Publikationen	123
8. A new Weaving Technique for Handling Overlapping Regions	125
9. Particle-Based Labeling: Fast Point-Feature Labeling without Obscuring Other Visual Features	127
10. Explode to Explain – Illustrative Information Visualization	129
11. Heterogeneity-based Guidance for Exploring Multiscale Data in Systems Biology	131
12. Supporting the Integrated Visual Analysis of Input Parameters and Simulation Trajectories	133
Literaturverzeichnis	135
Liste der wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Fachvorträge	163
Thesen	169

Abbildungsverzeichnis

2.1. Die Visualisierungspipeline	8
2.2. Das Data-State-Referenzmodell	9
2.3. Aspekte des Visual Clutters	11
2.4. Das NPR-Modell	15
2.5. Automatisch erzeugte Schraffur und Punktzeichnung	18
2.6. Halftoning durch Dithering	19
2.7. Automatisch extrahierte Feature Edges	21
2.8. Automatisch erzeugte freilegende Darstellungen	23
2.9. Schriftpositionmodelle und angewandte Beschriftung	25
2.10. Beispiele der illustrativen Volumenvisualisierung	29
2.11. Beispiele der illustrativen Strömungsvisualisierung	31
2.12. Ansätze einer illustrativen Informationsvisualisierung	33
3.1. Theoretische Kombinationen des NPRs und der Informationsvisualisierung	36
3.2. Betrachtete Kombinationen des NPRs und der Informationsvisualisierung	38
3.3. Bildmanipulationen im Data-State-Referenzmodell	42
3.4. Zusätzliche Grafikprimitive im Data-State-Referenzmodell	46
3.5. Modellmanipulationen im Data-State-Referenzmodell	50
3.6. Zusätzliche Transformationen im Data-State-Referenzmodell	51
3.7. Mögliche Kombinationen des NPR und der Informationsvisualisierung . .	52
3.8. Zusammenführung des NPR-Modells und des Data-State-Referenzmodells	54
3.9. Das erweiterte Data-State-Referenzmodell	56
4.1. Hervorhebung durch Halos	61
4.2. Visuelle Trennung durch verschiedene Stile	63
4.3. Visualisierung von Unsicherheiten mittels Aquarellsimulation	65
4.4. Prinzip des Papierflechtens	67
4.5. Weaving mit verschiedenen Auswahlfunktionen	68
4.6. Weaving mit verschiedenen Ebenenbelegungen	69
4.7. Angewandtes Weaving	70
4.8. Die entwickelten Lösungen im erweiterten Data-State-Referenzmodell . . .	73
5.1. Visualisierung von Unsicherheiten mit verwackelten Linien	77
5.2. Registrierung visueller Repräsentanten im Dynamic Space Management .	79
5.3. Excentric Labeling und Überlagerungsfreie lokale Beschriftung	80
5.4. Prinzipielle Behandlung wechselnder Beschriftungen	82

5.5.	Demonstration einer aktuell genutzten Beschriftung	83
5.6.	Durchlauf der Beschriftungspipeline	85
5.7.	Erzeugung von Konfliktpartikeln	86
5.8.	Überlagerungsfreie Beschriftung einer Graphvisualisierung	88
5.9.	Anwendung der überlagerungsfreien globalen Beschriftung	89
5.10.	Die entwickelten Lösungen im erweiterten Data-State-Referenzmodell . . .	91
6.1.	Freilegung mittels Importance Map	96
6.2.	Phantomzeichnungen in dreidimensionalen Visualisierungsverfahren	97
6.3.	Phantomzeichnungen in zweidimensionalen Visualisierungsverfahren	99
6.4.	Nicht erkennbare Pixelanordnung	100
6.5.	Explosionszeichnung eines ThemeRivers	103
6.6.	Explosionszeichnung impliziter Hierarchiedarstellungen	104
6.7.	Explosionszeichnung einer PixelMap	106
6.8.	Explosionszeichnung zur Verdeutlichung der Anordnung in PixelMaps . .	107
6.9.	Zeitliche Zerlegung der visuellen Repräsentation	108
6.10.	Die entwickelten Lösungen im erweiterten Data-State-Referenzmodell . . .	110
7.1.	Explosionszeichnungen zum Verständnis von Heterogenitätsinformationen	115
7.2.	Aquarellsimulation zur Visualisierung von Unsicherheiten	117
7.3.	Phantomzeichnungen in der Trajektorienvisualisierung.	119

Tabellenverzeichnis

5.1. Ergebnisse der partikelgestützten Punktbeschriftung	87
--	----

1. Einleitung

Motivation

Visualisierung Das grundlegende Ziel der Visualisierung liegt in der grafischen Darstellung von Daten, Prozessen oder Konzepten. Hierdurch kann die menschliche Entscheidungsfindung unterstützt werden und es können neue Erkenntnisse über die zu visualisierenden Informationen erlangt werden. Die Generierung derartiger Bilder motiviert sich aus der Erkenntnis, dass das visuelle System eines gesunden Menschen die Hauptinformationsquelle über die Umwelt ist und er dementsprechend stark auf die Verarbeitung visueller Informationen spezialisiert ist. Hinzu kommt, dass die Größe heutiger Datenmengen die Datenanalyse etwa in textueller Form für den Nutzer erschwert. Das Sprichwort „Ein Bild sagt mehr als tausend Worte“ ist eine oft zitierte Aussage, um die grafische Darstellung dieser Datenmengen und damit die Visualisierung zu motivieren.

In dem Forschungsgebiet der Visualisierung existieren viele unterschiedliche Fragestellungen und Probleme. Hierzu gehört an erster Stelle der Umgang mit wachsenden Datenmengen und -dimensionen. Genauso stellt sich die Frage, welche Visualisierungstechnik für ein gegebenes Datenszenario die geeignetste ist und ob eine solche Technik automatisch parametrisiert werden kann und darf. Es wird untersucht, wie spezielle Datencharakteristika wie Unsicherheiten oder Muster definiert und schließlich dargestellt werden können. Auch scheinbar einfache Fragen wie etwa nach geeigneten Farbskalen sind nicht abschließend bearbeitet. Diese Fragestellungen repräsentieren einen wichtigen Ausschnitt aktueller Forschung und werden zum Teil seit Jahrzehnten immer wieder thematisiert.

Durch die vorwiegende Fokussierung auf die zu visualisierenden Informationen, lassen sich mittlerweile sehr große Datenmengen und -dimensionen visualisieren, sodass inzwischen Millionen Daten in einem Bild kodiert werden können [FP02]. Dabei werden jedoch zunehmend die Grenzen der Wahrnehmungsfähigkeit des Anwenders erreicht, der nun mit der visuellen Aufbereitung seiner Daten kognitiv überfordert ist. So kann eine Visualisierung ihren erkenntnisfördernden Charakter verlieren und es kommt zum Paradoxon, wonach die Aussagekraft und die Menge kommunizierter Informationen abnimmt, obwohl mehr Informationen dargestellt werden. Aus diesem Grund rückt in der aktuellen Forschungsagenda der Nutzer mit seinen Aufgaben, Interessen, Fähigkeiten etc. aber auch die angepasste Darstellung der für ihn relevanten Informationen stärker in den Vordergrund (z.B. in [LKZ09]). Gerade für die angepasste Darstellung, die die Kommunikation der wesentlichen Informationen unterstützen soll, wird in verschiedenen Visualisierungsbereichen wie der Volumen- und Strömungsvisualisierung auf Verfahren des so bezeichneten *Nicht-photorealistischen Renderings* (NPR) zurückgegriffen – jedoch kaum im Bereich der Informationsvisualisierung, die sich mit der Visualisierung abstrakter Daten beschäftigt.

Unterstützung der Bildkommunikation im Nicht-photorealistischen Rendering Die Fokussierung auf *relevante* Informationen wird im NPR schon länger mit dem Ziel aufgegriffen, eine verbesserte Kommunikation von Bildinformationen durch entsprechende Manipulationen im Bilderzeugungsprozess zu erreichen (vgl. [GG01, SS02]). Hieraus resultierende optische Veränderungen sind der Grund für die namensgebende Unterscheidung vom photorealistischen *Rendering*. Die Definition über Eigenschaften, die das NPR *nicht* erfüllt – nämlich photorealistisch zu sein – führt wiederholt zu Diskussionen bezüglich der Begrifflichkeit und Abgrenzung. Allgemein zeichnet sich das NPR vor allem durch das Einbringen zusätzlicher Methodiken bei der Bilderzeugung aus. Maßgeblich sind hier Stile und damit verbundene Stilmittelvariationen bei der Bilderzeugung zu nennen [Sch07]. Wird durch die Stile ganz gezielt die Kommunikation von Informationen unterstützt, so spricht man von der illustrativen Computergrafik. Die hierfür genutzten NPR-Techniken wurden seit den 90er Jahren entwickelt und sind inzwischen in Lehrbüchern (z.B. [GG01, SS02, RC13]) dargestellt. Das NPR stellt einen möglichen Lösungsansatz für die Kommunikation relevanter Informationen in der Visualisierung dar.

Illustrative Visualisierung Entsprechend der obigen Begriffserklärung des NPRs ist das gesamte Gebiet der Visualisierung als nicht-photorealistisch einzuordnen. Das heißt jedoch nicht, dass in der klassischen Visualisierung bereits bewusst oder gezielt die Stilmittel, die das NPR ausmachen, ausgenutzt werden. Vielmehr steht hier die Abbildung von Daten auf visuelle Variablen wie Formen und Farben im Vordergrund. Für das *Rendering* bedient sich die Visualisierung in der Regel der Standardgrafikbibliotheken und greift nur vereinzelt auf NPR-Verfahren zurück. Erst in neuerer Zeit wird verstärkt versucht, Erkenntnisse der Illustration auf das Gebiet der Visualisierung zu übertragen, um die Kommunikation wichtiger Informationen zu unterstützen. Die Anwendung illustrativer Methoden in der Visualisierung findet seinen Niederschlag in dem Gebiet der *illustrativen Visualisierung* (erstes allgemeines Tutorial 2005 [VGB⁺05], vgl. [RBGV08]). Da NPR-Verfahren zur Anwendung in der Regel aber Bilder oder eine gegebene Geometrie voraussetzen, wurden sie bisher vornehmlich in Visualisierungsbereichen eingesetzt, die eine geometrische Interpretation zulassen und in einem räumlichen Bezugssystem definiert sind. Dies erklärt, dass bisherige Publikationen zur illustrativen Visualisierung vorwiegend im Bereich der Volumenvisualisierung und Strömungsvisualisierung zu finden sind und hier zu maßgeblichen Verbesserungen geführt haben (vgl. [VGB⁺05, GPE⁺05, VBS⁺07]): Gerade im Umfeld der medizinischen Volumenvisualisierung werden – motiviert durch klassische Illustrationen – illustrative Techniken genutzt, um die Sichtbarkeit wichtiger Daten (z.B. Organe) zu erhöhen oder zu garantieren. Dies bringt Vorteile bei der Analyse auf Basis bildgebender Verfahren (z.B. CT) und der Operationsplanung. Die Deakzentuierung weniger wichtiger Daten durch entsprechende Stile unterstützt die schnelle Lokalisation wichtiger Strukturen zusätzlich. Durch derartige Verfahren ähneln die Visualisierungen auch zunehmend bekannten medizinischen Lehrbuchabbildungen (z.B. in *VolumeShop* [BG05]), was den Umgang mit den Daten unterstützen kann.

Problem- und Zielstellung

Illustrative Informationsvisualisierung Wachsende Datenmengen und die damit verbundenen Probleme bei deren Visualisierung treten auch in der Informationsvisualisierung auf. Auch hier ist es zunehmend sinnvoll, die wesentlichen Informationen so darzustellen, dass sie leichter und schneller aufgefunden beziehungsweise interpretiert werden können, um hierdurch den Erkenntnisgewinn zu unterstützen. Die Anwendung illustrativer Konzepte in der Informationsvisualisierung erscheint als möglicher Ansatz, der in der gängigen Literatur bisher aber kaum betrachtet wurde.

Die Ausrichtung der Illustration auf eine verbesserte Bildkommunikation und die so erzielten Erfolge in der Volumen- und Strömungsvisualisierung motivieren die in dieser Dissertation thematisierte Anwendung illustrativer Verfahren in der Informationsvisualisierung. Das Ziel der Arbeit ist es, zu untersuchen, wie sich NPR-Methoden allgemein in den Prozess der Informationsvisualisierung integrieren und illustrativ nutzen lassen. Um eine fundierte theoretische Grundlage für eine illustrative Informationsvisualisierung zu schaffen, soll die prinzipielle Anwendbarkeit der NPR-Methoden auf Konzeptebene diskutiert werden. Die praktische Umsetzung ausgewählter NPR-Techniken in Verfahren der Informationsvisualisierung soll die Anwendbarkeit dieser Untersuchungen belegen.

Ein wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Dissertation und Ausgangspunkt der genannten Untersuchungen sind vier wesentliche NPR-Bereiche, die in Kapitel 2.2 detailliert dargestellt werden. Gemäß HALPER et al. [HIR⁺03] und SCHLECHTWEIG [Sch07] lassen sich NPR-Methoden einem oder mehreren dieser Bereiche zuordnen:

- ▷ **Modellmanipulationen** modifizieren das Geometriemodell, um zusätzliche Informationen zu kodieren, oder modifizieren es entsprechend zusätzlicher Informationen.
- ▷ **Bildmanipulationen** werden häufig genutzt, um zusätzliche Informationen ins Bild einzubringen, oder um die Bilddarstellung anhand zusätzlicher Informationen zu ändern.
- ▷ **Zusätzliche Grafikprimitive** gelten im NPR als zweidimensionale Datenstrukturen zwischen dreidimensionalen Modellen und zweidimensionalen Bildern, die vielfältig attribuiert werden können und mit denen in der Regel verschiedene Stile definiert werden.
- ▷ **Zusätzliche Transformationen** ergeben sich durch die Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive und die Einbeziehung von Modell- und Bildmanipulationen. Dadurch werden sie zu einem integralen Bestandteil der Bilderzeugung.

In dieser Arbeit wird die Integration dieser NPR-Bereiche in den Prozess der Informationsvisualisierung untersucht. Es wird hierfür ein neues Modell entworfen, das eine konzeptuelle Grundlage für die Entwicklung konkreter Verfahren definiert. Die entwickelten Ansätze demonstrieren, wie die Kommunikation ausgewählter Informationen unterstützt werden kann und sind Beispiele einer *illustrativen Informationsvisualisierung*.

Ansatz und eigene Beiträge

Diese Arbeit zeigt den Einsatz von NPR-Methoden in der Informationsvisualisierung. Die vorliegende Dissertation leistet diesbezüglich zwei wesentliche Beiträge: Zum Einen erfolgt eine *konzeptuelle Untersuchung* der Kombination des NPRs und der Informationsvisualisierung. Hierdurch werden die prinzipiellen Grenzen und Möglichkeiten einer Kombination dieser Bereiche aufgezeigt. Auf der anderen Seite erfolgt die *exemplarische Anwendung* konkreter NPR-Verfahren in Verfahren der Informationsvisualisierung. So wird gezeigt, dass die Kombination nicht nur möglich, sondern auch praktisch umsetzbar und sinnvoll ist.

Konzeptuelle Untersuchung Zur Modellierung des Visualisierungsprozesses wird in der vorliegenden Arbeit das Data-State-Referenzmodell von CHI und RIEDL [CR98] verwendet. Es erfasst alle Teilschritte der Informationsvisualisierung und ist derartig flexibel, dass sämtliche existierenden Visualisierungsstrategien mit diesem Modell beschrieben werden können. Bezogen auf das NPR werden die von HALPER et al. und SCHLECHTWEG identifizierten NPR-Bereiche gewählt, da hiermit eine analoge Beschreibung der NPR-Verfahren möglich ist. Die Kombination der verschiedenen NPR-Bereiche mit dem Data-State-Referenzmodell eröffnet eine Vielzahl neuer Möglichkeiten und führt schließlich zum neu entworfenen *erweiterten Data-State-Referenzmodell* (vgl. Kap. 3). Dieses Modell ermöglicht die abstrakte Beschreibung bereits existierender Ansätze, unterstützt aber auch die Entwicklung neuer Lösungen für eine *illustrative Informationsvisualisierung*. Die in dieser Arbeit präsentierten Ansätze sind somit als exemplarische Umsetzungen einer illustrativen Informationsvisualisierung auf Basis des erweiterten Data-State-Referenzmodells zu sehen.

Konkrete Lösungen Neben der konzeptuellen Betrachtung präsentiert diese Dissertation konkrete Anwendungen von NPR-Verfahren in Visualisierungstechniken der Informationsvisualisierung. Um zu zeigen, dass sämtliche NPR-Bereiche in einer illustrativen Informationsvisualisierung eine Rolle spielen, werden neu entwickelte Methoden vorgestellt, die alle diese NPR-Bereiche aus den Arbeiten von HALPER et al. [HIR⁺03] beziehungsweise SCHLECHTWEG [Sch07] abdecken. Die entwickelten Lösungen lassen sich im erweiterten Data-State-Referenzmodell darstellen.

▷ *Modellmanipulationen* werden in dieser Arbeit durch die Anwendung von *Explosions-* und *Phantomzeichnungen* behandelt. Diese Techniken zählen zu den freilegenden Darstellungen und werden exemplarisch in verschiedene konkrete Visualisierungstechniken integriert. Mit der Anwendung dieser Verfahren gelingt es unter anderem, verdeckte Informationen in der visuellen Repräsentation sichtbar zu machen und somit ihre Lokalisation zu unterstützen. Die beiden entwickelten Ansätze wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation als jeweils eigenständige begutachtete Konferenzbeiträge [LS07b, LS08a] publiziert. Eine Erweiterung der Explosionszeichnungen wurde als Poster [RLTS08] vorgestellt .

-
- ▷ *Bildmanipulationen* werden im Rahmen dieser Dissertation zu verschiedenen Zwecken eingesetzt. Die entwickelten Verfahren zeigen an verschiedenen Visualisierungstechniken, dass sich mit diesen Verfahren etwa visuelle Repräsentanten differenzieren, hervorheben und freilegen lassen. Zudem können Unsicherheiten durch Bildmanipulationsverfahren kommuniziert werden. Die entworfenen Verfahren greifen dabei auf das *Dithering*, Punktzeichnungen, Schraffuren, Kantendarstellungen, Aquarelle, Halos sowie das dem *Dithering* nahe stehende *Weaving* zurück. Die Nutzung von Halos und des *Weavings* in Visualisierungsverfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit in zwei Konferenzbeiträgen [LS08b, LRS10a], die Nutzung von Aquarellen in Form eines Posters [LRS10b] veröffentlicht.
 - ▷ *Zusätzliche Grafikprimitive* werden mit der Nutzung von *Strokes* und Beschriftungen betrachtet. Letztere sind ähnlich wie *Strokes* von Geometrie und Bild unabhängig, bedürfen jedoch einer sorgfältigen Platzierung, um beispielsweise ihre Lesbarkeit und so die Kommunikation zusätzlicher Informationen zu gewährleisten. Deshalb wurden im Rahmen dieser Arbeit drei Schriftplatzierungsmethoden entwickelt und in verschiedenen Visualisierungsverfahren eingesetzt. Sie wurden in eigenständigen Konferenzbeiträgen [FLH⁺06, CLS09] und einem Zeitschriftenartikel [LSC08] veröffentlicht. Die *Strokes* wurden hingegen zur Visualisierung von Unsicherheiten eingesetzt. Dieser Beitrag wurde als Poster [LRS10b] vorgestellt.
 - ▷ *Zusätzliche Transformationen* stellen das Bindeglied zwischen den obigen Bereichen dar und sind integraler Bestandteil vieler aufgezählter Techniken. Sie werden etwa benötigt, um Beschriftungen unter Berücksichtigung anderer dargestellter Objekte zu platzieren. Dieser NPR-Bereich ist deshalb in den oben genannten Beiträgen bereits integriert und wird deshalb nicht gesondert betrachtet.

Die vorgestellten Lösungen beziehen sich auf die Entwicklung illustrativer Techniken für die Informationsvisualisierung. Daneben wird auch die Anwendung dieser Techniken an weiteren Visualisierungsbeispielen demonstriert, so zum Beispiel bei der Exploration von Parameter- und Datenräumen im Umfeld der Simulation biologischer Prozesse. Die genannten Visualisierungsverfahren wurden in den begutachteten Konferenzbeiträgen [LMS⁺12, LRE⁺12, LTB⁺12] sowie einem Zeitschriftenartikel [LRHS14] veröffentlicht.

Struktur der Arbeit

Die vorliegende Dissertation gliedert sich in zwei Teile, wovon der erste Teil sieben Kapitel umfasst. In Kapitel 2 werden zunächst die wichtigen Grundlagen aus den Bereichen der Informationsvisualisierung und des NPRs vermittelt und jeweils der Stand der Technik dargelegt. Ebenso werden existierende Arbeiten der illustrativen Visualisierung und speziell der illustrativen Informationsvisualisierung betrachtet. In Kapitel 3 erfolgt die konzeptuelle Untersuchung zur Kombination von NPR und Informationsvisualisierung mit einer systematischen Analyse der Kombinationsmöglichkeiten. Darauf aufbauend wird hier

auch das erweiterte Data-State-Referenzmodell hergeleitet. Die anschließenden Kapitel widmen sich dann den konkreten praktischen Lösungen und stellen verschiedene Techniken zu Bildmanipulationen (Kap. 4), zusätzlichen Grafikprimitiven (Kap. 5) und Modellmanipulationen (Kap. 6) in Visualisierungsverfahren der Informationsvisualisierung vor. In Kapitel 7 wird gezeigt, wie sich die entwickelten Ansätze auf die Visualisierung von Simulationsdaten anwenden lassen. Zudem wird die Dissertation zusammengefasst und ein Ausblick gegeben. Der 2. Teil der Arbeit enthält die wichtigsten Publikationen, die die Grundlage für die Diskussion im ersten Teil bilden.

2. Grundlagen und Stand der Forschung

Diese Dissertation führt die Informationsvisualisierung und das NPR mit dem Ziel einer illustrativen Informationsvisualisierung zusammen. Deshalb werden in diesem Kapitel zuerst die Grundlagen zur Informationsvisualisierung (2.1) und zum Nicht-photorealistischen *Rendering* (2.2) bereitgestellt, die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit wichtig sind. Es werden Begriffe eingeführt und relevante Ansätze der beiden Bereiche vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit Anwendung finden. Die erfolgreiche Anwendung des NPRs in der Visualisierung wird mit der Vorstellung existierender Arbeiten in Abschnitt 2.3 betrachtet. Neben Lösungen aus der illustrativen Volumen- und Strömungsvisualisierung – die die vorliegende Arbeit motivieren – werden hier auch erste Ansätze der illustrativen Informationsvisualisierung (2.3.5) präsentiert.

2.1. Informationsvisualisierung

2.1.1. Begriffsklärung

Die Visualisierung beschäftigt sich allgemein mit der Generierung von Bildern aus Daten und lässt sich durch die so genannte Visualisierungspipeline modellieren (z.B. [HM90, SB04], Abb. 2.1). Deren Stufen umfassen die Aufbereitung der Daten im *Filtering*, die Abbildung der Daten auf geometrische Primitive im *Mapping* sowie deren Darstellung durch das *Rendering*. Die Visualisierung wird im Allgemeinen aufgrund der zu visualisierenden Daten in verschiedene Gebiete unterteilt, wobei die jeweiligen Grenzen als fließend anzusehen sind. Die *Volumenvisualisierung* befasst sich beispielsweise mit der Darstellung von skalaren Daten im dreidimensionalen Raum. Die *Strömungsvisualisierung* wird genutzt, wenn es sich um vektorielle Daten handelt. Das in dieser Arbeit betrachtete Gebiet der *Informationsvisualisierung* beschäftigt sich mit der Visualisierung so bezeichneter abstrakten Daten. Dazu sollen zwei Definitionen angegeben werden:

„[Information visualization is the] use of computer-supported, interactive, visual representations of abstract data to amplify cognition.“ [CMS99, S.7]

„We define information visualization more generally as the communication of abstract data [...] through the use of visual interfaces.“ [KMSZ06, S.2]

Als abstrakte Daten werden hierbei Daten aufgefasst, die nicht notwendigerweise einen räumlichen Bezug oder eine natürliche geometrische Repräsentationen aufweisen. Es ist kein einfaches Problem, für derartige Daten beim *Mapping* eine geeignete Abbildung auf visuelle Variablen zu finden (siehe Kap. 2.1.3).



Abbildung 2.1.: Die Visualisierungspipeline angelehnt an HABER und McNABB [HM90].

2.1.2. Das Data-State-Referenzmodell

Um den Prozess der Informationsvisualisierung sowohl für Nutzer als auch Entwickler greifbar zu machen, aber auch um existierenden Systeme einordnen zu können, wurden verschiedene Referenzmodelle für die Informationsvisualisierung entwickelt (z.B. in [CMS99, RF94, SM00]). Sie orientieren sich vorwiegend an der allgemeinen Visualisierungspipeline und ergänzen diese um spezifische Aspekte der Informationsvisualisierung.

Ein umfassendes und flexibles Referenzmodell für die Informationsvisualisierung, das die Beschreibung sämtlicher Visualisierungstechniken ermöglicht, wird von CHI und RIEDL als *Data State Model* eingeführt [CR98]. Dieses Modell führt neben den Stufen der Pipeline (*Filtering*, *Mapping*, *Rendering*) so genannte Datenzustände und Operatoren auf diesen Zuständen ein (siehe Abb. 2.2). Die zu visualisierenden Daten durchlaufen in diesem Modell folgende Zustände:

- ▷ *Werte* stellen die unbearbeiteten Rohdaten dar, die zu visualisieren sind.
- ▷ *Analytische Abstraktionen* sind das Ergebnis der im *Filtering* angewendeten Methoden. Sie können Metadaten enthalten.
- ▷ *Visuelle Abstraktionen* liegen nach dem *Mapping* in Form geometrischer Daten vor. Dieses *geometrische Modell* wird mit Hilfe des *Mappings* aus der analytischen Abstraktion erzeugt und lässt sich schließlich darstellen¹.
- ▷ *Bilddaten* stellen das Ergebnis des *Renderings* dar, wobei aus der geometrischen Beschreibung ein Bild erzeugt wird, welches die zu visualisierenden Daten repräsentiert. Die Daten der Bilddatenebene werden dem Nutzer präsentiert.

Für die Überführung und Manipulation der Datenzustände werden Zustandsoperatoren und Transformationsoperatoren genutzt:

- ▷ *Zustandsoperatoren* wirken nur auf die Daten innerhalb eines Zustandes, d.h. der Datenzustand vor und nach der Ausführung des Operators ist der gleiche. Hierzu gehört beispielsweise eine Sortierung der Daten.
- ▷ *Transformationsoperatoren* werden genutzt, um die Daten von einem Zustand in den nächsten zu überführen. Sie werden als *Data Transformation*, *Visualization Transformation* und *Visual Mapping Transformation* eingeführt [CR98], was allgemein dem *Filtering*, *Mapping* und *Rendering* entspricht.

¹Die Begriffe *Geometrisches Modell* und *Visuelle Abstraktion* bedeuten im Wesentlichen die gleiche Datenform und werden in der vorliegenden Dissertation synonym verwendet.

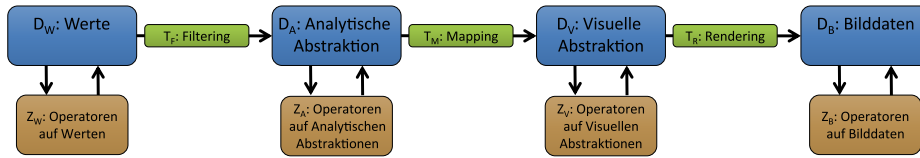


Abbildung 2.2.: Das Data-State-Referenzmodell nach CHI und RIEDL [CR98]. Der Visualisierungsprozess wird als stufenweise Umwandlung der Roh- in Bilddaten angesehen. Für die Verarbeitung und Umwandlung der Daten in und zwischen den Datenzuständen (blau) werden Zustandsoperatoren (beige) und Transformationsoperatoren (grün) genutzt.

In der vorliegenden Arbeit werden die Datenzustände auch als D_W (Werte), D_A (Analytische Abstraktion), D_V (Visuelle Abstraktion) und D_B (Bilddaten) bezeichnet. Die dazugehörigen Zustandsoperatoren werden entsprechend mit Z_W , Z_A , Z_V und Z_B benannt. Die Transformationsoperatoren werden für das *Filtering* mit T_F , das *Mapping* mit T_M und für das *Rendering* mit T_R angegeben (vgl. Abb. 2.2).

Das Data-State-Referenzmodell findet eine weite Anwendung in der Informationsvisualisierung (vgl. [HA06]) und wird deshalb auch in der vorliegenden Dissertation genutzt.

2.1.3. Visuelle Variablen und visuelle Repräsentanten

Das in der Informationsvisualisierung aus den Daten erzeugte Bild hängt wesentlich von den *Mapping*-Operatoren T_M ab. In diesen werden die Daten auf visuelle Abstraktionen abgebildet, die schließlich durch das *Rendering* in ein visuell rezipierbares Bild umgewandelt werden. Die visuelle Abstraktion ist durch eine Kombination so genannter *visueller Variablen* gekennzeichnet, die für die Darstellung der Daten genutzt werden. BERTIN [Ber81] beschreibt die visuellen Variablen, zu denen Größe, Helligkeit, Farbe, Richtung, Form, Textur und Position gehören. MACKINLAY [Mac86] verfeinert diese Menge und trennt beispielsweise die Variable Farbe in Farbton und -sättigung auf. Hinzu kommen weitere Variablen wie Dichte, Kapselung und Verbundenheit. Weiterhin untersucht er die Eignung der visuellen Variablen für unterschiedliche Datentypen. Von dieser Eignung hängt unter anderem ab, ob eine Visualisierung gewissen Gütekriterien genügt (vgl. Kap. 2.1.4).

Die Abbildung der Daten auf visuelle Variablen erzeugt eine Repräsentation der Daten. Je nach *Mapping* können verschiedene Datenaspekte in der Repräsentation gut oder weniger gut identifiziert werden – beispielsweise konkrete Werte oder Strukturen. So könnte ein einzelner Datenwert durch die Position eines Punktes, eine Verbindung in einem Netzwerk als verbindende Linie und die zugehörige Verbindungsqualität wiederum als Farbe der Linie identifiziert werden. Diese beispielhaft genannten Bestandteile der visuellen Abstraktion, die konkret der Datendarstellung dienen, werden in dieser Arbeit als *visuelle Repräsentanten* bezeichnet. Sie sind also darstellbare geometrische Objekte, die mittels ein oder mehrerer visueller Variablen Datencharakteristika wiedergeben.

2.1.4. Gütekriterien und Visual Clutter

Die Vielfaltigkeit publizierter Visualisierungstechniken verdeutlicht, dass es viele Möglichkeiten gibt, die Zustands- und Transformationsoperatoren des Data-State-Referenzmodells umzusetzen und zu kombinieren. Visualisierungssysteme bieten dem Nutzer außerdem meist umfassende Möglichkeiten, diese Operatoren sowie deren Parameter auszutauschen. Nicht jede mögliche Umsetzung wird aber dem Ziel der Visualisierung gerecht und fördert den Erkenntnisgewinn. So wird die Qualität einer Visualisierung im Allgemeinen durch die folgenden Gütekriterien festgelegt (siehe [Mac86, SM00]):

- ▷ **Expressivität** Sie ist die Grundvoraussetzung einer Visualisierung und verlangt, dass die wichtigen Informationen einer Datenmenge und nur diese dargestellt werden.
- ▷ **Effektivität** Diese beschreibt, wie gut (z.B. bzgl. Genauigkeit, Geschwindigkeit) sich für den Nutzer relevante Informationen aus der Visualisierung entnehmen lassen. Hierbei spielen die Zielstellung und Fähigkeiten des Nutzers, der Anwendungskontext sowie die Eigenschaften des Ausgabegerätes eine wichtige Rolle.
- ▷ **Angemessenheit** Sie kennzeichnet das Verhältnis zwischen dem Aufwand der durch eine Visualisierung erzeugt wird (z.B. Rechenaufwand) und den von ihr kommunizierten Informationen.

Die Verletzung der Expressivität führt in der Regel zu einer falschen Interpretation der Daten. Wird die Effektivität nicht beachtet, so verzögert sich meist die Extraktion der Informationen aus der Visualisierung. Einen ähnlichen Einfluss kann die Verletzung der Angemessenheit haben, die etwa zu einer verzögerten Erstellung der Visualisierung führt. Mit dem einleitend beschriebenen Problem der wachsenden Datenmengen wird es zunehmend schwieriger, die genannten Kriterien einzuhalten. So kann beispielsweise die Verarbeitungszeit der Daten ansteigen (Angemessenheit), es können wichtige Informationen aufgrund der Masse der dargestellten Daten in den Hintergrund treten (Effektivität) oder sogar überlagert werden (Expressivität). Dies sind Aspekte des so genannten *Visual Clutters*, das gemäß ROSENHOLTZ et al. wie folgt definiert wird:

„Clutter is the state in which excess items, or their representation or organization, lead to a degradation of performance at some task. Excess and/or disorganized display items can cause crowding [...], masking [...], decreased object recognition performance due to occlusion, and impaired visual search performance [...]. More items can also stretch or exceed the limits of short-term memory [...].“ [RLN07, S.3]

Der Begriff *Visual Clutter* umfasst somit etwa Zustände wie die Verdeckung durch Überhäufung (*Crowding*), bei der zu viele visuelle Repräsentanten von den relevanten Informationen ablenken, die Verdeckung durch Maskierung (*Masking*), bei der ähnliche visuelle Repräsentanten (z.B. bzgl. Form und Farbe) die Wahrnehmung relevanter Informationen erschweren, aber auch die Verdeckung durch Überlagerung (*Occlusion*) relevanter Informationen (vgl. Abb. 2.3). *Visual Clutter* gehört demgemäß zu den wesentlichen Auslösern

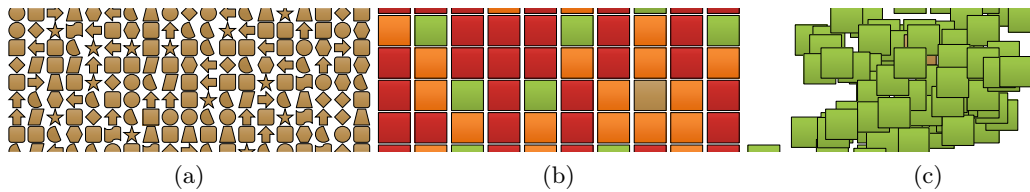


Abbildung 2.3.: Aspekte des *Visual Clutters*: Verdeckung durch Überhäufung (a), Maskierung (b) und Überlagerung (c). Das beige Quadrat ist nur schwer zu finden.

einer verletzten Expressivität und herabgesetzten Effektivität in der Informationsvisualisierung. Deshalb wird versucht, *Visual Clutter* weitestgehend zu vermeiden oder durch nachträgliche Modifikationen im Visualisierungsprozess abzumildern. Mehrere Arbeiten fassen entsprechende Verfahren zur *Clutter*-Reduktion zusammen (siehe [ED07, Few08]). Sie lassen sich gemäß ELLIS und DIX [ED07] in drei Gruppen unterteilen:

- ▷ **Die Auswahl und Darstellung** visueller Repräsentanten beschreibt zwei prinzipielle Wege zur Clutterreduktion: Zum Einen lässt sich die Anzahl dargestellter visueller Repräsentanten reduzieren (*Sampling*, *Filtering*, *Clustering*) und zum Anderen ist eine Anpassung der Darstellung möglich (Verkleinerung, Deckkraft). Beim *Sampling* wird ein Auswahlmechanismus genutzt, der sich *nicht* an den Eigenschaften *einzelner* Daten orientiert, aber statistische Eigenschaften der gesamten Datenmenge berücksichtigen kann. Demgegenüber berücksichtigt das *Filtering* die einzelnen Dateneigenschaften und nutzt entsprechende Vergleiche. Das *Clustering* fasst mehrere Daten gemäß ihrer Eigenschaften zusammen und reduziert hierdurch die Anzahl sichtbarer visueller Repräsentanten. Mit einer *Verkleinerung* gelingt es, gegenseitige Überlagerungen visueller Repräsentanten zu reduzieren. Verringert man die *Deckkraft*, so können überlagerte visuelle Repräsentanten sichtbar werden.
- ▷ **Räumliche Verzerrungen** reduzieren das *Visual Clutter*, indem die Anordnung der visuellen Repräsentanten beeinflusst wird. Hierzu zählt zunächst die *Verschiebung* visueller Repräsentanten derart, dass gegenseitige Überlagerungen verringert werden (z.B. *Jittering*). Im Gegensatz hierzu wird bei *topologischen Verzerrungen* der Bezugsraum der visuellen Repräsentanten modifiziert, um die Sichtbarkeit sonst überlagelter visueller Repräsentanten zu erhöhen. Mit so genannten *Space-Filling*-Verfahren, wird der zur Verfügung stehende Platz entsprechend einer festgelegten Strategie für die Platzierung der visuellen Repräsentanten optimal genutzt. Beim *Pixel-Plotting* werden schließlich die einzelnen Pixel jeweils als visueller Repräsentant verwendet. Somit treten keine Überlagerungen auf und es lassen sich sehr große Datenmengen darstellen. Auch durch ein *Dimensional Reordering* – ein Neuaneinanderordnen der Dimensionen mit deren Hilfe die Position der visuellen Repräsentanten festgelegt wird – lässt sich *Visual Clutter* gelegentlich reduzieren.

- ▷ *Zeitliche Verfahren* führen eine *Clutter*-Reduktion durch, indem die Gesamtheit der Daten sukzessiv angezeigt wird. Nach ELLIS und DIX [ED07] ist die einzige Methode hierfür die *Animation*. Die Daten werden nacheinander dem Nutzer präsentiert, um so die Anzahl gleichzeitig sichtbarer visueller Repräsentanten zu reduzieren.

Die oben genannten Gütekriterien Expressivität, Effektivität und Angemessenheit erlauben lediglich eine qualitative Beschreibung der Visualisierungsqualität. Sie sind nicht dazu ausgelegt, die erwähnten Gegenmaßnahmen für *Visual Clutter* automatisch in den Visualisierungsprozess einzubinden. Hierfür werden quantitative Beschreibungen benötigt, die mit Hilfe spezieller Metriken ausgedrückt werden. Metriken wie *Overplotting*, *Overcrowding* und *Hidden* werden beispielsweise genutzt, um verschiedene Verhältnisse zwischen (überlagerten) Datenwerten und mehrfach genutzten Pixeln abzubilden [ED06b]. Mit dem *Data-Ink-Ratio* und der *Data-Density* werden zwei Metriken beschrieben [Tuf01], die das Verhältnis der visualisierten Daten und der hierfür benötigten Pixel bzw. Fläche erfassen. Neben dieser Auswahl visualisierungs- und datenunabhängiger Metriken existieren weitere, die sich beispielsweise mit der Wahrnehmbarkeit spezieller Dateneigenschaften befassen. So wird etwa die visuelle Trennbarkeit von Clustern zur Bewertung von *Scatterplots* genutzt [SNLH09, TAE⁺09] oder die Dichte der Punkteverteilungen als Maß für *Visual Clutter* verwendet [BS04, BS05]. Wiederum andere Metriken zielen eher auf den menschlichen Wahrnehmungsprozess und sprechen von *Visual Clutter*, wenn neu hinzugefügte visuelle Repräsentanten nicht wahrgenommen werden [RLMJ05] oder die bildliche Struktur nicht erhalten wird [WF03]. Sie sind in der Regel weitreichender als die bisher genannten Metriken und decken zum Teil deren Eigenschaften mit ab – allerdings ist ihre rechentechnische Umsetzung oft nicht einfach (z.B. [RLMJ05]). BERTINI et al. geben einen Überblick über verschiedene Metriken [BTK11].

Die automatische Visualisierungsanpassung durch Nutzung *Clutter*-beschreibender Metriken mit einer entsprechenden Reduzierung des *Visual Clutters* wurde mehrfach demonstriert (siehe etwa [BS05, ED06a, SNLH09]).

2.1.5. Interaktion

Ein integraler Bestandteil der Informationsvisualisierung ist die Interaktion. Sie wird in verschiedenen Definitionen und schematischen Darstellungen der Informationsvisualisierung explizit aufgeführt (z.B. [CMS99]). Interaktionen werden vorrangig genutzt, um den Visualisierungsprozess zu steuern. Dazu wird dem Nutzer die Möglichkeit eingeräumt, in die verschiedenen Stufen der Visualisierungspipeline einzugreifen und so entscheidend das Ergebnis des Visualisierungsprozesses zu beeinflussen. Bezogen auf das Data-State-Referenzmodell werden also Möglichkeiten geschaffen, die verschiedenen Operatoren und deren Parameter zu modifizieren.

Die hierfür genutzten Interaktionstechniken decken ein weites Spektrum ab, die sich verschieden kategorisieren lassen (z.B. [Shn96, WY04]). YI et al. stellen für die Kategorisierung die Intention des Nutzers in den Vordergrund [YKSJ07], wobei sich sieben Interaktionskategorien ergeben:

- ▷ **Auswahl** Auswahltechniken umfassen in der Regel zwei wesentliche Punkte: Zum Einen erlauben sie dem Nutzer, interessierende Daten auf allen Stufen des Data-State-Referenzmodells *direkt* auszuwählen und zum Anderen markieren sie diese Daten visuell. So lassen sich diese Daten in wechselnden Konfigurationen der Visualisierungspipeline (z.B. Austausch von Zustands- oder Transformationsoperatoren) und zum Teil auch in großen Datenmengen leichter auffinden. Auswahl- bzw. Selektionsinteraktionen werden oft mit anderen Interaktionstechniken gekoppelt.
- ▷ **Erkundung** Derartigen Techniken ermöglichen es dem Nutzer, zwischen verschiedenen Ausschnitten der darzustellenden Datenmenge zu wechseln. Dies muss nicht den vollständigen Austausch der dargestellten Daten bedeuten, sondern ist viel öfter ein Hinzufügen und Entfernen einzelner visueller Repräsentanten in der Visualisierung. Ein typisches Beispiel für diese Interaktion ist das Verschieben des Bildausschnitts.
- ▷ **Neuanordnung** Diese Techniken stellen eine Neuordnung der visuellen Repräsentanten bereit; meist um hierdurch verschiedene Aspekte der Daten hervorzuheben. Die Sortierung der Daten bezüglich eines Attributes oder der Austausch von Achsen seien hierfür beispielhaft genannt. Auch Techniken, die Überlagerungen interaktiv reduzieren, gehören hierzu (z.B. *Jittering*).
- ▷ **Kodierung** Diese Techniken beeinflussen das *Mapping* auf visuelle Variablen (siehe Kapitel 2.1.3). Hierdurch soll es ermöglicht werden, ein *Mapping* zu finden, das die Daten bzw. spezielle Dateneigenschaften für den Nutzer effektiv kommuniziert.
- ▷ **Granularität** Interaktionstechniken, die es gestatten, zusätzliche Details einzublenden oder aber diese Details zu reduzieren, sind Teil dieser Kategorie. Hierzu gehört etwa das geometrische Zoomen oder auch *Tool-Tip*-Techniken.
- ▷ **Filterung** Interaktive Filtertechniken werden genutzt, um Daten anzuzeigen, die bestimmten Bedingungen genügen. Im Gegensatz zu den oben genannten Auswahltechniken, werden die Daten *indirekt* ausgewählt, da Filtertechniken die Bedingungen manipulieren, die bestimmen ob ein Datenelement angezeigt wird.
- ▷ **Verknüpfung** Zu diesen Techniken werden Verfahren gezählt, die zum Einen Verbindungen zwischen visualisierten Daten verdeutlichen und zum Anderen zusätzliche Daten einblenden, die mit einem gewählten Datenelement assoziiert sind. Beispielhaft seien das *Linking* und *Brushing* sowie die Expansion von Knoten in Hierarchiedarstellungen genannt.

Die benannten Interaktionstechniken lassen sich auf unterschiedlichen Stufen des Data-State-Referenzmodells umsetzen. Eine Neuordnung kann beispielsweise als Sortierung von Datenwerten oder als Manipulation des *Mapping* umgesetzt werden. In dieser Arbeit sind vor allem die Selektion und die Filterung von Bedeutung, da sie festlegen können, welche Daten vom Nutzer als relevant eingestuft werden – eine Bewertung die für die illustrative Visualisierung notwendig ist. Eine entsprechende Ausführung hierzu erfolgt in Kapitel 2.3.2.

2.2. Nicht-photorealistisches Rendering

2.2.1. Begriffsklärung

Das *Nicht-photorealistische-Rendering* (NPR) adressiert eine Bilderzeugung, deren Ergebnis bewusst nicht photorealistisch ist. MASUCH gibt beispielsweise folgende Definition an:

„Als nicht-photorealistisch bezeichnen wir Bilder, deren Elemente zwar realistische Aspekte der Abbildung beinhalten, deren Darstellungsweise jedoch aufgrund der Verwendung bestimmter Stilmittel in den Bereichen Form, Farbe, Struktur, Schattierung, Licht oder Schattenwurf von der wahrnehmbaren Wirklichkeit abweichen.“ [Mas01, S.22]

Neben dem Begriff *Nicht-photorealistisches Rendering* sind für bestimmte Methoden weitere Bezeichnungen eingeführt worden (siehe [SS02, S.10ff]). Verfahren, die Kunstwerke nachbilden (z.B. Ölgemälde), werden etwa zum *Artistic Rendering* zusammengefasst. Genauso kann die nachgebildete Zeichentechnik zur Namensgebung genutzt werden; etwa beim *Stipple Rendering* (Bildgenerierung aus Punkten) oder dem *Pen-and-Ink-Rendering* (Bildgenerierung mit stricherzeugenden Mitteln). Eine Betrachtung des Zwecks der Bilderzeugung – vorrangig dem einer besseren Kommunikation von Informationen – führt beispielsweise zum *Illustrativen Rendering*. Keine dieser Bezeichnungen erfasst aber das gesamte Spektrum des NPRs und so stellen sie eher dessen Teilbereiche dar.

Eine der wichtigsten Motivationen des NPRs liegt in der verbesserten Informationsvermittlung (siehe [GG01, S.1], [SS02, S.8ff]). Hierfür werden oft klassische Illustrationsverfahren nachgebildet. NPR-Verfahren, die in der Anwendung der verbesserten Kommunikation von Informationen dienen, werden deshalb allgemein als *illustrativ* bezeichnet. Folglich wird in der Visualisierung der Begriff *illustrative Visualisierung* genutzt (z.B. [VGB⁺05, GPE⁺05, ESB⁺06, RBGV08]), wenn Daten mittels NPR-Verfahren besser vermittelt werden sollen. Dieses Prinzip wird in der vorliegenden Arbeit übernommen.

SCHLECHTWEG legt dar, dass es vor allem die zusätzlichen Methodiken bei der Bilderzeugung, die sich daraus ergebenden Stile und Stilvariationen sind, die das NPR definieren und abgrenzen [Sch07]. Diese zusätzlichen Methoden sind gemäß HALPER et al. [HIR⁺03] und SCHLECHTWEG vier Bereichen zuzuordnen, die an dieser Stelle noch einmal kurz beschrieben werden sollen (aus [Sch07, S.13]):

- ▷ **Modellmanipulationen** Das dreidimensionale Geometriemodell als Ausgangspunkt der Bilderzeugung wird häufig manipuliert, um zusätzliche Informationen darin zu kodieren oder um es durch diese zusätzlichen Informationen gezielt zu verändern.
- ▷ **Bildmanipulationen** Das Ergebnis des *Renderings* ist oft nicht das Endprodukt einer nicht-photorealistischen Bilderzeugung. Bildverarbeitungs- und -manipulationstechniken werden häufig angewendet, um zusätzliche Informationen im Bild darzustellen bzw. die Darstellung des Bildes anhand zusätzlicher Informationen zu ändern. Einige NPR-Techniken verzichten auch gänzlich auf ein dreidimensionales Geometriemodell und sehen ein zweidimensionales Bild als Eingabe vor.

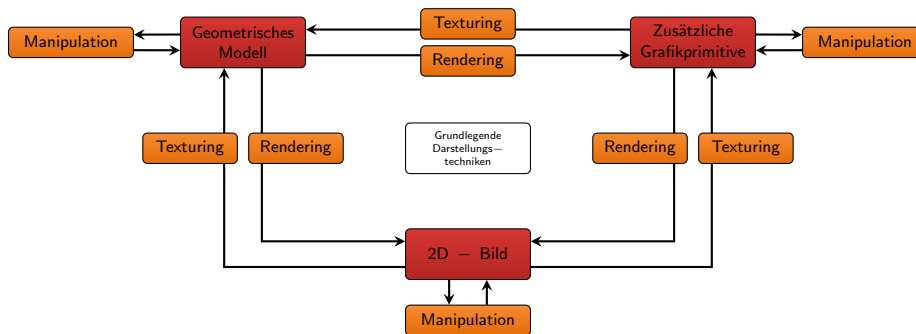


Abbildung 2.4.: Die im NPR zur Bilderzeugung genutzten Datenstrukturen sowie die entsprechenden Transformationen, angelehnt an SCHLECHTWEG [Sch07].

- ▷ **Zusätzliche Grafikprimitive** Als Zwischenstufe zwischen dem dreidimensionalen Geometriemodell und der Beschreibung eines Bildes als zweidimensionale Pixelanordnung werden weitere Grafikprimitive, die *Strokes* verwendet. Diese sind in der Regel dadurch charakterisiert, dass sie eine von Pixeln unabhängige Größe besitzen und vielfältig attributiert werden können – also selbst wiederum manipulierbar sind. Über die Ausgestaltung der zusätzlichen Grafikprimitive werden oft verschiedene Stile definiert.
- ▷ **Zusätzliche Transformationen** Durch die Einführung zusätzlicher Grafikprimitive sowie die Einbeziehung von Modell- und Bildmanipulationen ergeben sich zusätzliche Transformationen, die zu einem integralen Bestandteil der Bilderzeugung werden.

Diese NPR-Bereiche sowie deren Zusammenspiel werden in Abbildung 2.4 dargestellt. Die abgebildeten Begriffe *Rendering* und *Texturing* stehen für die jeweils möglichen Transformationen und sind als Abstraktion konkreter Verfahren beispielsweise zur *Stroke*-Erzeugung, -attributierung und -platzierung zu sehen (siehe [Sch07]). Neben den vier genannten Bereichen wird auch auf die grundlegenden Darstellungstechniken der Computergrafik zurückgegriffen. Die NPR-Bereiche lassen sich auch als Zustände und Zustandsübergänge bei der nicht-photorealistischen Bilderzeugung auffassen (siehe [HIR⁺03]).

Viele der durch NPR-Verfahren erzeugbaren Effekte sind nicht durch die Anwendung eines *einzigsten* NPR-Bereichs umsetzbar, sondern sind vielmehr eine unterschiedlich gewichtete Kombination verschiedener Bereiche. Beispielsweise sind Verfahren, die Kunststile nachbilden, in der Regel eine Kombination zusätzlicher Grafikprimitive, der Bildmanipulation und entsprechend notwendiger zusätzlicher Transformationen. Solche Verfahren, die verschiedene NPR-Bereiche kombinieren, werden allgemein und auch in der vorliegenden Arbeit als *hybride* Verfahren bezeichnet (siehe [HIR⁺03]).

Es sei an dieser Stelle festgehalten, dass der Begriff *Stil* in der vorliegenden Arbeit eine sichtbare Kombination der in der obigen Definition aufgeführten Stilmittel darstellt.

2.2.2. Abstraktion als illustratorisches Prinzip

Die Literatur über die Illustration befasst sich hauptsächlich mit den benötigten handwerklichen und technischen (z.B. [Woo94, Hod03]) zum Teil auch kreativen und ökonomischen Aspekten (z.B. [HA00, Wig07]). Wegen der vielseitigen Anwendungsgebiete für Illustrationen und der Nähe zur bildenden Kunst (siehe [Wig07]) existieren aber kaum Anleitungen bzw. Prinzipien zur konkreten Erzeugung. Unabhängig von konkreten Zielsetzungen ist der Literatur aber als allgemeines Prinzip eine Reduktion auf das Wesentliche zu entnehmen, die FOLEY et al. wie folgt zusammenfassen:

„If the ultimate goal of a picture is to convey information, then a picture that is free of the complications of shadows and reflections may well be more successful than a tour de force of photographic realism.“ [FDFH95, S.605]

STROTHOTTE stellt die Reduktion auf die wesentlichen zu kommunizierenden Bildinhalte als notwendige Methodik zur Hervorhebung wichtiger zu kommunizierender Informationen und Abschwächung weniger wichtiger Informationen dar – und bezeichnet dies als Abstraktionsprozess [Str98]. Die Reduktion sollte dabei dann eingesetzt werden, wenn

- nicht alle Details zur Kommunikation wesentlicher Informationen notwendig sind,
- nicht alle Details darstellbar sind,
- die Darstellung aller Details den Nutzer überlasten würde.

Die hierbei entfernten Details werden im Allgemeinen nicht für die Schaffung eines *mental Modells* (Vorstellung eines Betrachters über eine Sache und/oder dessen Funktionsweise) benötigt [SS02]. Stattdessen kann die hervorgehobene Abbildung von Wiedererkennungsmerkmalen hierfür von größerer Bedeutung sein.

Die eigentliche Zielstellung der Abstraktion besteht also darin, wichtige von weniger wichtigen Informationen zu trennen und diese Trennung für den Betrachter offensichtlich zu machen [Str98]. Da jede Hervorhebung grafischer Objekte zu einer relativen Abschwächung anderer Objekte führt, kann eine visuelle Trennung auch *ohne* Entfernung grafischer Details erfolgen. Die von STROTHOTTE angeführte Definition des Abstraktionsbegriffs bezieht sich deshalb weniger auf den Detailgehalt als vielmehr die angesprochene Trennbarkeit (siehe [Str98, S.14]).

Zusammenfassend gehört also die oft genutzte Detailreduktion bzw. die *Deakzentuierung* aber auch die Detailanreicherung und das Hervorheben von Bildinhalten bzw. die *Akzentuierung* zu den Mitteln der Abstraktion – auch wenn primär die Detailreduktion mit dem Begriff *Abstraktion* assoziiert wird. In dieser Arbeit werden beide Möglichkeiten zur Unterstützung der Kommunikation von Informationen in einer illustrativen Informationsvisualisierung genutzt. Dazu werden verschiedene NPR-Verfahren in Visualisierungstechniken der Informationsvisualisierung integriert. Die zur Anwendung kommenden NPR-Verfahren werden nachfolgend dargestellt.

2.2.3. Verfahren des Nicht-photorealistischen Renderings

Die meisten NPR-Methoden sind in einschlägigen Lehrbüchern des NPRs (z.B. [GG01, SS02, RC13]) zusammengefasst. Mit ihnen können unter anderem klassische Illustrationstechniken, wie sie in Illustrationslehrbüchern (etwa [Hod03, Woo94]) wiedergegeben sind, nachgebildet werden. Wegen des Umfangs existierender Ansätze, werden nachfolgend nur jene Techniken ausführlicher betrachtet, die in dieser Arbeit zur Anwendung kommen.

2.2.3.1. Strokes und Strokeplatzierung

Ein wichtiger Bestandteil des NPR sind *Strokes*, die für die Umsetzung vieler NPR-Verfahren notwendig sind. Sie gehören zu den zusätzlichen Grafikprimitiven [Sch07]. Im Allgemeinen werden sie genutzt, um künstlerische Werkzeuge oder Techniken nachzubilden. Nach HERTZMANN [Her03] ist die Platzierung diskreter Elemente ein zentraler Bestandteil des *Stroke*-basierten *Renderings* – unabhängig davon, ob dies Pinselstriche, Punkte oder Mosaiksteine sind. Mit dieser weitreichenden Definition sind viele NPR-Verfahren dem *Stroke*-basierten *Rendering* zuzuordnen. Für eine bessere Übersicht werden hier nur allgemeine Ansätze zur *Stroke*-Definition und -Platzierung zusammengefasst, während spezifischere Verfahren in den nachfolgenden Abschnitten betrachtet werden.

STRASSMANNs *Hairy Brushes* [Str86] stellen eine wichtige Arbeit zur Definition linienerzeugender Werkzeuge – speziell von Pinselstrichen – dar. Die vorgestellte Pinselhaarsimulation ermöglicht jedoch nur eine eingeschränkte *Stroke*-Definition. Die *Skeletal Strokes* von HSU et al. führen zu einer vereinfachten *Stroke*-Definition und bieten größere Freiheiten [HLW93]. Mit ihnen kann jedes Bild zur *Stroke*-Definition verwendet werden. Mit den von SCHUMANN entwickelten *Line Styles* werden Linien entsprechend eines Parameters entlang ihres Verlaufes modifiziert (siehe [SS02]). Die als *G-Strokes* vorgestellte Datenstruktur vereinfacht schließlich die *Stroke*-Parametrisierung [IB06]. Aufwendigere Verfahren zur Strokedefinition – etwa mithilfe dreidimensionaler Pinselkopfmodelle – werden etwa von DiVERDI zusammengefasst [DiV13].

Neben der Erzeugung spielt die *Stroke*-Platzierung nach künstlerischen aber auch illustratorischen Gesichtspunkten eine wichtige Rolle. Solche Verfahren stellen in der Regel zusätzliche Transformationen und Bildmanipulationen dar. Für die *Stroke*-Platzierung existieren unterschiedliche Herangehensweisen. So werden im *Difference Image Algorithm* [SWHS97] für Schraffuren (*Hatching*) etwa Helligkeitswerte des Eingabebildes genutzt. Dieser Ansatz wird bei der Ölgemäldesimulation [Her98] mit unterschiedlichen Ebenen und *Stroke*-Größen kombiniert. Bei Mosaiken [Hau01, SGS05a, FHHD05] und Punktzeichnungen (*Stippling*) [BSD09] versucht man hingegen, möglichst gleichförmige *Stroke*-Verteilungen etwa mit Hilfe von *Voronoi-Zerlegungen* zu erreichen. Für die *Stroke*-Ausrichtung können aus den Bildern erzeugte Vektorfelder oder Gradienten genutzt werden [TB96, FHHD05, ZZXX09]. Weitere Ansätze zur *Stroke*-Platzierung werden etwa von HERTZMANN [Her03], BATTIATO et al. [BBGP11] und ZHANG [Zha13] zusammengefasst.

Strokes und ihre Variationen werden in dieser Arbeit zur Definition unterschiedlicher Stile und zur Visualisierung zusätzlicher Informationen genutzt (Kap. 4 und 5).

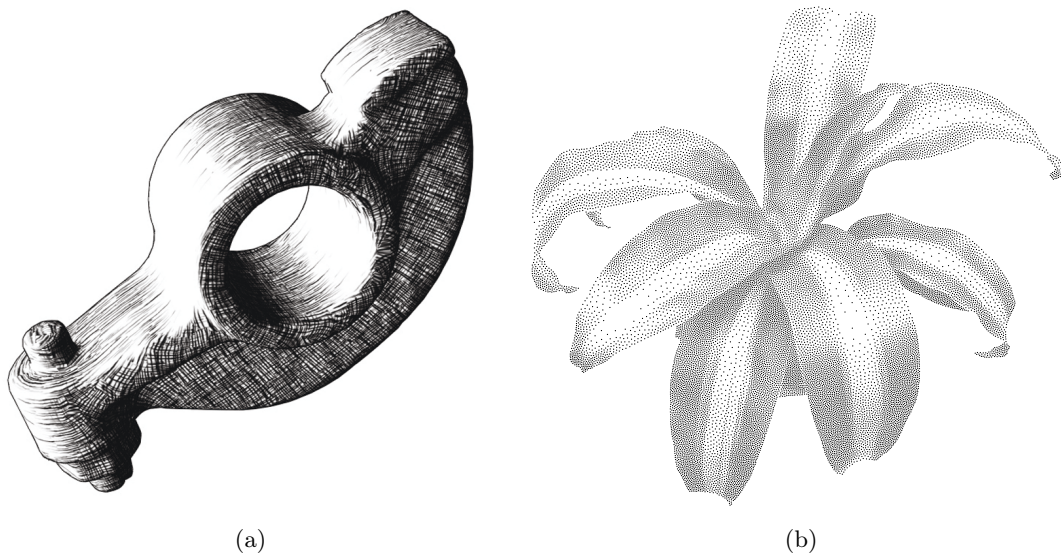


Abbildung 2.5.: Eine automatisch erzeugte Schraffur (a) und Punktzeichnung (b). Aus [PHMF01, BSD09] (v.l.n.r.).

2.2.3.2. Schraffuren

Schraffuren (Engl.: *Hatching*) sind eine Art der Bildumsetzung, die den *Pen-And-Ink*-Verfahren zuzuordnen ist. Da bei Schraffuren *Strokes* mit Hilfe zusätzlicher Transformationen platziert und dabei Bild- oder Modelldaten genutzt beziehungsweise manipuliert werden, können Schraffuren den hybriden Verfahren zugerechnet werden.

Das Ziel der Schraffurverfahren besteht darin, eine Strichverteilung zu erzeugen, die annähernd die korrekten Helligkeitsinformationen und gleichzeitig wichtige Details der Eingabe widerspiegelt. SALISBURY et al. nutzen für die Helligkeitswiedergabe priorisierte *Stroke*-Texturen [SABS94]. Da Helligkeitsinformationen bei einer Skalierung des Eingabebildes und gleichzeitiger Beibehaltung der Details jedoch schwer zu erhalten sind, koppeln WINKENBACH und SALESIN auch die Details an die Priorisierung [WS94]. Richtungsinformationen werden später von SALISBURY et al. in Schraffuren integriert [SWHS97]. Mittels der *Tonal Art Maps* – einer Weiterentwicklung priorisierter *Stroke*-Texturen – gelingt die Schraffur von 3D-Modellen in Echtzeit [PHMF01]. Diese Verfahren wird kurze Zeit später von WEBB et al. aufgegriffen, um die Wiedergabe der Helligkeitswerte zu verbessern [WPFH02]. Eine weitere Verbesserung gelingt unter besonderer Berücksichtigung der Krümmungsinformationen [ZISS04]. Auch handgefertigte Illustrationen werden teilweise als Eingabe genutzt, um mittels entsprechender Analysen beliebige andere Modelle halbautomatisch zu schraffieren [GI13]. Weitere Ansätze werden unter anderem von STROTHOTTE und SCHLECHTWEG [SS02] und ZANDER et al. [ZISS04] zusammengefasst. Abbildung 2.5(a) zeigt ein Beispiel einer automatisch erzeugten Schraffur.

In Kapitel 4 dienen Schraffuren der Deakzentuierung weniger relevanter Informationen.



Abbildung 2.6.: Farbreduktion durch *Dithering*. Die Abbildung (a) wird in (b) mittels des *Floyd-Steinberg-Ditherings* nur durch fünf Farben dargestellt. Im *Ordered Dithering* ist es unter anderem möglich, gezielt Muster in die Ausgabe einzubringen (c).

2.2.3.3. Halftoning

Die Reproduktion von Bildern und die Erzeugung von Illustrationen ist oft an materielle Einschränkungen gekoppelt (siehe [Hod03]). Hierzu gehört auch die Anzahl verfügbarer Farben, die besonders bei der Reproduktion in Printmedien eine wichtige Rolle spielt. Bei einer begrenzten Farbanzahl versucht man mit *Halftoning*-Methoden, den selben Farbeindruck zu simulieren, den das Originalbild aufweist. Dabei werden mehrere alternative Farben so platziert, dass der wahrgenommene Farbeindruck annähernd dem Originalstimulus entspricht. Zu diesen Techniken können unter anderem das *Dithering*, das *Screening* und aber auch die Zeichentechnik der Punktzeichnungen gezählt werden. DEUSSEN und ISENBERG geben diesbezüglich einen aktuellen Überblick [DI13].

- ▷ **Dithering** Bei diesen Verfahren wird das Bild Pixel für Pixel bezüglich der Farb- und Helligkeitsinformation analysiert und in der Ausgabe durch die Farben einer festgelegten (oft reduzierten) Palette ersetzt. Um ungewollte Farbmuster gerade in Farbverläufen zu vermeiden, wird mit Hilfe des *Floyd-Steinberg-Dithering* [FS76] der pro Pixel gemachte Fehler auf die benachbarten Pixel verteilt. Hierdurch wird eine bessere Wiedergabe des Eingabebildes erzielt. Alternative Fehlerverteilungen für dieses grundlegende Prinzip versuchen etwa, die Kanten besser zu erhalten oder weniger Muster zu erzeugen (siehe u.a. [Uli00, Ost01, Tie07, PQW⁺08, CAO09, LM10]). Als Erweiterung werden mit Hilfe so genannter *Dithermatrizen* mehrere Pixel eines kleineren Bereiches zusammen analysiert und durch vordefinierte Pixelmuster ersetzt (siehe [SS02]).

Während für die Reproduktion in Printmedien vor allem versucht wird, die Erzeugung von Artefakten und Mustern durch entsprechende Matrizen und Fehlerverteilungen zu vermeiden, werden im NPR derartige Muster aber auch gezielt erzeugt (siehe z.B. [VB00, SS02], vgl. Abb.2.6(c)).

- ▷ *Screening* ist eine an Dithermatrizen angelehnte Methode des *Halftonings*. Hierbei versucht man visuell zusätzliche Informationen in das Bild zu integrieren. Zu diesem Zweck werden die *Dither*-Matrizen zu so genannten *Dither Screens* erweitert, womit prinzipiell jedes beliebige Bild genutzt werden kann (z.B. [OH95]). Um das Eingabebild korrekt wiederzugeben, müssen die *Screens* bestimmte Bedingungen erfüllen (z.B. Gleichverteilung der Schwellwerte). Dies erschwert die Erzeugung von *Dither Screens* zwar, ermöglicht aber die Einbettung von Texten und anderen Symbolen bei größtmöglicher Erhaltung des Originalbildes (siehe etwa [VB99]).
- ▷ *Punktzeichnungen* (Engl.: *Stippling*) versuchen Helligkeitsverteilungen mit Punkten korrekt wiederzugeben. Das Ziel besteht darin, die wichtigen Kanten und die Intensitäten des Eingabebildes präzise wiederzugeben und in gleichfarbigen Gebieten des Eingabebildes keine Muster zu erzeugen. Durch diese Nähe zum *Dithering* (vgl. [DI13]), wird diese ursprünglich manuelle Technik hier dem *Halftoning* zugerechnet. Das Augenmerk liegt bei Punktzeichnungen vor allem auf der Erzeugung guter Punktverteilungen, die den beschriebenen Anforderungen genügen (siehe auch [SS02]). Gängige Verfahren für die Erzeugung entsprechender Verteilungen wie etwa *Lloyd's algorithm* [Llo82], wurden für Punktzeichnungen erweitert (z.B. [DHOS00, Sec02]) und relaxieren etwa Ergebnisse des *Ditherings* [DHOS00]. Mittlerweile gelingt die Erzeugung solcher Punktverteilungen in Echtzeit [KCODL06]. Der Ansatz von BALZER et al. [BSD09] ist zwar nicht echtzeitfähig, übertrifft bisherige Arbeiten aber bezüglich der Rauscheigenschaften. Diese Herausforderungen können teilweise umgangen werden, wenn handgemachte Punktzeichnungen als zusätzliche Eingabe dienen [KMI⁺09]. Derartige Illustrationen lassen sich aber auch mittels einer Grauwertkonvertierung für verschiedene Auflösungen erzeugen [MALI10]. Andere Ansätze wiederum konzentrieren sich auf den Erhalt von Kanteninformationen (z.B. [Mou07, KSL⁺08, LM11]). Abbildung 2.5(b) zeigt ein Beispiel einer automatisch erzeugten Punktzeichnung.

Halftoning-Verfahren gehören primär zum Bereich der Bildmanipulationen, da sie von einem Bild als Eingabe ausgehen. Je nach Verfahren (z.B. *Screening*, Punktzeichnungen), können aber auch neue Elemente in das Bild integriert und somit auch der Bereich der zusätzlichen Grafikprimitive und der zusätzlichen Transformationen einbezogen werden.

In Kapitel 4 wird ein durch *Halftoning* inspiriertes Verfahren zur Auflösung von Überlagerungen betrachtet. Darüber hinaus werden diese Verfahren in dieser Arbeit zur Deakzentuierung genutzt. Entsprechende Ausführungen erfolgen ebenfalls in Kapitel 4.

2.2.3.4. Linien und Halos

Um die Form eines dreidimensionalen Objektes zu kommunizieren, müssen oft nur charakteristische Linien gezeichnet werden. Die Extraktion und Darstellung dieser so genannten *Feature Edges* [GG01] ermöglicht eine Reduktion auf die wesentlichen zu kommunizierenden Inhalte aber auch eine Hervorhebung wichtiger Objekte. Entsprechende Verfahren können als hybrid angesehen werden, da sowohl Modellinformationen (z.B. Normalen,

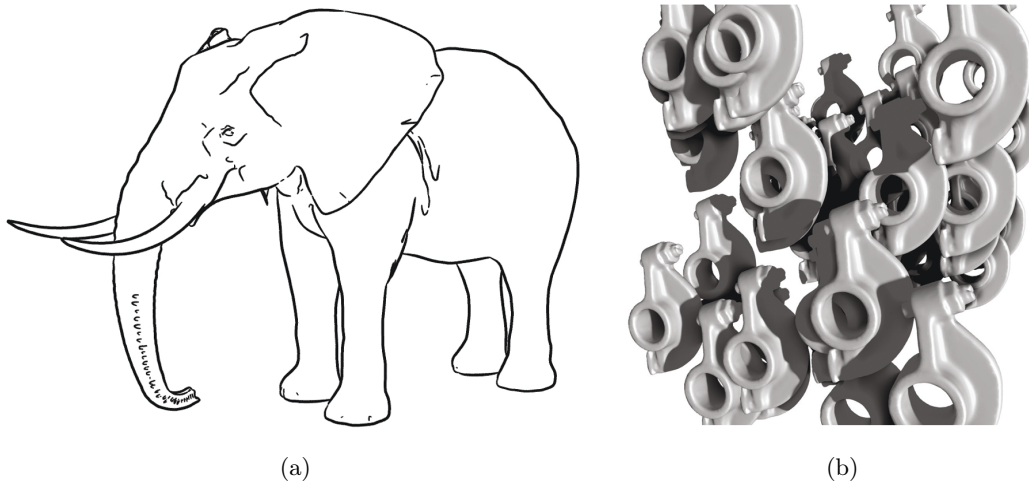


Abbildung 2.7.: Automatisch extrahierte *Feature Edges* (a) und eingebrachte dunkle Halos (b) unterstützen die Erkennbarkeit von Strukturen und die Differenzierbarkeit verschiedener Objekte. Aus [DFRS03, LCD06] (v.l.n.r.).

Tiefen, Identitäten), Bildinformationen als auch *Strokes* kombiniert und genutzt werden können.

Zu den charakteristischen Linien gehören Silhouetten, Begrenzungen und Falten (siehe [Goo98]). SAITO und TAKAHASHI [ST90] nutzen einen bildbasierten Ansatz zur Darstellung von Silhouetten und Falten, welcher von DECAUDIN um die Darstellung von Begrenzungen erweitert wird [Dec96]. Andere Weiterentwicklungen ermöglichen die Extraktion aussagekräftigerer blickpunktabhängiger *Feature Edges* (z.B. [HZ00]). So vermitteln *Suggestive Contours* [DFRS03] und so genannte *Highlight Lines* [DR07] die wesentlichen Formen eines dargestellten Objektes weitaus genauer (Abb. 2.7(a)). Die Attributierung von *Feature Edges* (z.B. der Liniendicke) kann dabei aus der Illustration übernommen werden (siehe [GG01]).

Gemäß GOOCH und GOOCH können äußere Konturen auch für die Platzierung von Halos genutzt werden. Diese Technik wird in der Malerei benutzt, um Objekte hervorzuheben und visuell vom Hintergrund abzuheben. Dazu wird der Kontrast zwischen Objekt und Umgebung lokal angepasst. Zu Halos lassen sich äußere Konturen, schmale freigelassene Bereiche um das Objekt oder kaum wahrzunehmende Schattierungen zählen. Mit ihnen kann etwa die Tiefenwahrnehmung sich kreuzender Linien unterstützt werden [ARS79]. Fast 30 Jahre später, werden Halos in Verbindung mit moderner Hardware verwendet, um die Tiefenwahrnehmung in Fotografien zu verbessern [LCD06] (Abb. 2.7(b)).

Derartige Verfahren dienen in Kapitel 4 der Akzentuierung relevanter Informationen und in Kapitel 6.2 der Darstellung des Kontextes.

2.2.3.5. Freilegende Darstellungen

Viele Illustrationen stellen Projektionen dreidimensionaler Objekte dar (z.B. [PW10]). Um die Lage dieser Objekte im Raum und auch ihre funktionale Bedeutung zu veranschaulichen, ist es oft nötig, das Objekt in seinem entsprechenden Kontext zu zeigen. Da dieser Kontext das Objekt nicht selten vollständig umschließt, werden freilegende Darstellungen genutzt. Die wichtigsten illustratorischen Darstellungen dieser Art sind *Explosionszeichnungen*, *Phantomzeichnungen* und *Schnittzeichnungen*.

Freilegende Darstellungen gehören vorrangig zum Bereich der Modellmanipulationen, da sie grundsätzlich Informationen über den Aufbau des 3D-Modells benötigen und dieses schließlich zur Verbesserung der Sichtbarkeiten modifizieren (z.B. Deckkraft, Verschiebung, Skalierung). Zum Teil werden auch zusätzliche Kanten in diese Illustrationen integriert, die etwa aus Bildmanipulationsverfahren stammen.

▷ *Explosionszeichnungen* sind eine weit verbreitete illustrative Darstellungstechnik, die genutzt wird, um komplexe geometrische Objekte nachvollziehbar in ihre Bestandteile zu zerlegen [Die05]. Damit wird das Verständnis der Funktionsweise des komplexen Objektes erleichtert und die Lokalisation einzelner wichtiger Bestandteile unterstützt. Dies geschieht zum Einen durch das Sichtbarmachen und Freistellen des hervorzuhebenden Bestandteils als auch durch das Anbringen hinweisender und illustrierender zusätzlicher grafischer Elemente in den entstandenen Freiräumen (Pfeile, Verbindungslinien, Beschriftungen...). Das Ziel bei der Erstellung einer Explosionszeichnung ist es, die verschiedenen Bestandteile räumlich so zu trennen, dass sämtliche Teile möglichst vollständig sichtbar sind, deren Lage- und Zugehörigkeitsbeziehungen einfach zu entnehmen sind und dass die dargestellte Dekomposition mental einfach wieder zusammengefügt werden kann [Poe94].

Den Ausgangspunkt einer Explosionszeichnung bildet ein relevantes Objekt oder eine Objektgruppe, die es gilt sichtbar darzustellen und dabei von weniger relevanten Objekten zu trennen. Im allgemeinen Fall werden Sichtbarkeitsberechnungen vorgenommen und die Distanzen zu verdeckenden Objekten vergrößert. Die Explosion erfolgt meist achsenparallel, um das mentale Umkehren der Explosion zu vereinfachen. Aus dem gleichen Grund wird versucht, die Anzahl von Subexplosionen – die Dekomposition weiterer Bestandteile bereits freigelegter Objekte – zu minimieren.

Explosionszeichnungen werden in verschiedenen Domänen verwendet. Dabei stehen vor allem dreidimensionale Objekte und deren Dekomposition im Vordergrund. Entsprechende Vorarbeiten untersuchen beispielsweise die automatische Erzeugung von Montageanleitungen und Illustrationen (z.B. [APH⁺03, LAS04]) oder die Exploration von 3D-Modellen (z.B. [CCF96, NHAH03, SCS04, KTS09]). Der umfassende automatische Ansatz von Li et al. [LACS08] ermöglicht eine vollständige und korrekte Objektzerlegung. Weitere Arbeiten versuchen schließlich, die Komplexität automatisch erzeugter Explosionszeichnungen zu reduzieren (z.B. [TKS10, TKS11]).

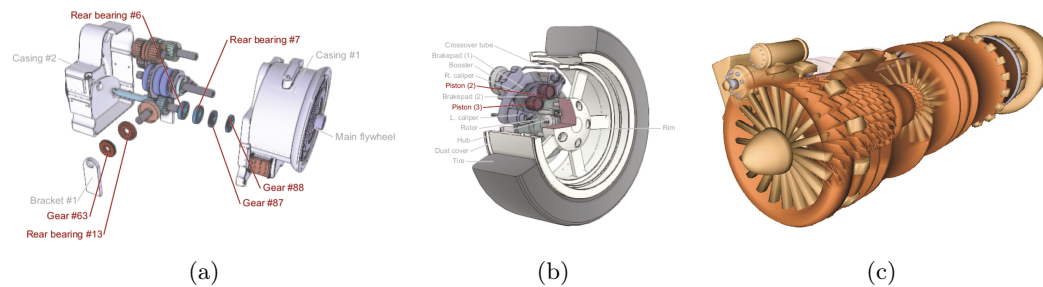


Abbildung 2.8.: Automatisch erzeugte freilegende Darstellungen. Mit der Explosionszeichnung (a), Schnittzeichnung (b) und Phantomzeichnung (c) werden (nur) die interessierenden Bestandteile der Modelle freigelegt. Der für Schnittzeichnungen typische Treppeneffekt ist in (b) gut zu erkennen. Aus [LACS08, Li08, HBP⁺07] (v.l.n.r.).

▷ **Phantom- und Schnittzeichnungen** ermöglichen die sichtbare Darstellung sonst überlagerter Objekte, ohne deren Position zu verändern [Die05, Čmo08]. Dies erlaubt deren Darstellung an ihrer eigentlichen Position und unterstützt ihre Lokalisation.

Den Ausgangspunkt von Phantomzeichnungen (Engl.: *Ghosted Views*) bildet das relevante, sichtbar abzubildende Objekt. Unter Berücksichtigung der Betrachterposition werden dann die verdeckenden Objekte lokal transparent dargestellt. Um den Tiefeneindruck zu erhalten und den Informationsverlust in den transparenten Bereichen zu reduzieren, werden die verdeckenden Objekte oft halbtransparent gezeichnet. Dabei ist auf illustratorische Regeln bezüglich der Transparenznutzung zu achten (z.B. [DWE02]). Alternativ können *Feature Edges* der verdeckenden Objekte angezeigt werden (sog. *phantom lines* [DWE02]). Hieraus resultieren verschiedene Ansätze für die Erzeugung von Phantomzeichnungen (z.B. [Die05, HBP⁺07, Čmo08]).

Der Unterschied zwischen Phantom- und Schnittzeichnungen (Engl.: *Cut-Away-Views*) besteht darin, dass bei der letzteren Darstellungstechnik keine Informationen der verdeckenden Objekte gezeigt werden. Um trotzdem die Tiefenwahrnehmung zu erhalten, ist es notwendig, das Ausschneiden dieser Objekte zu verdeutlichen. Oft werden dafür die verdeckenden Objekte vom innersten zum äußersten in zunehmendem Maße entfernt. Der entstehende Treppeneffekt verdeutlicht, wie viele Schichten vor dem freigelegten Objekt liegen.

Vor der automatischen Generierung von Schnittzeichnungen nach allen illustratorischen Gesichtspunkten [LRA⁺07] gab es bereits Ansätze, die Schnittzeichnungen ohne Treppeneffekt erzeugen (z.B. [DWE03, HBP⁺07]). Die Arbeit von BURNS und FINKELSTEIN [BF08] ermöglicht korrekte Schnittzeichnungen für beliebige polygonale Modelle. Weitere Arbeiten adressieren die Manipulation von Schnittzeichnungen [KHG09] oder eine verbesserte automatische Schnittplatzierung [SFCP12].

Abbildung 2.8 zeigt Beispiele freilegender Darstellungen. In Kapitel 6 unterstützen derartige Verfahren die Lokalisation und Interpretation einzelner visueller Repräsentanten.

2.2.3.6. Beschriftung

Beschriftungen gehören zu den klassischen illustratorischen Mitteln. Sie werden vornehmlich genutzt, um dargestellte Objekte leichter zu identifizieren oder Detailinformationen zu diesen Objekten bereitzustellen. Sie dienen in der Illustration außerdem dazu, um eine Beziehung zwischen den Bildinhalten und Texten herzustellen, die sich inhaltlich auf die Abbildung beziehen [Str98, Göt08]. In dieser Arbeit werden Beschriftungen den zusätzlichen Grafikprimitiven zugeordnet. Diese Einordnung wird in Kapitel 3 ausführlicher betrachtet. Die nachfolgend hauptsächlich adressierte Schriftplatzierung ist wie die *Stroke*-Platzierung primär den zusätzlichen Transformationen zuzuordnen.

Die wesentliche Herausforderung bei der Beschriftung von Bildelementen besteht darin, eine Beschriftung aller dargestellten Objekte zu finden, bei der sich die angebrachten Beschriftungen nicht überlappen. Es handelt sich hierbei um ein NP-vollständiges Problem (siehe [MS91, KT96]). Erst mit dem Erreichen einer so genannten konfliktfreien Beschriftung, rücken Aspekte wie beispielsweise die Schriftgestaltung in den Fokus. Das Beschriftungsproblem lässt sich in die Bereiche der Punkt-, Linien- und Flächenbeschriftung unterteilen (siehe [Imh75]). Vor allem die Punktbeschriftung wird aufgrund der weitreichenden Anwendungsmöglichkeiten untersucht (vgl. [WS09]). Beschriftungen befinden sich dabei gewöhnlicherweise tangential am Punktobjekt (*adjazente* Beschriftung) und folgen bis heute gültigen Präferenzen [Yoe72, Imh75] (siehe Abb. 2.9(a)–(c)). Beschriftungen, die sich nicht direkt am zu beschriftenden Objekt befinden, werden *externe* Beschriftungen genannt. Die Zusammengehörigkeit von Schrift und Objekt wird hierbei über verbindende Linien angezeigt.

Der Schwerpunkt der aktuellen Forschung liegt in einer schnellen automatischen konfliktfreien und trotzdem hochwertigen Beschriftung. Die NP-Vollständigkeit des Problems zwingt zu Kompromissen und führt damit zu Lösungsansätzen, die verschiedene Teilaspekte stärker fokussieren. So existieren Methoden, die sehr viele Beschriftungen hochqualitativ platzieren können, aber relativ hohe Laufzeiten aufweisen (z.B. in [Rai98, YL05]). Andere Techniken fokussieren auf eine interaktionsfähige Beschriftung (aktualisierte Beschriftung beim Zoomen, Scrollen...). Dabei wird im Allgemeinen auf zeitintensive Vorberechnungen zurückgegriffen, die deshalb keinen spontanen Austausch der zu beschriftenden Objekte zulassen (z.B. in [PGP03, BDY06]). Andere Verfahren mit sehr gutem Laufzeitverhalten aber ohne Vorberechnungen, wie etwa das diskrete Gradientenabstiegsverfahren (vgl. [CMS95]), erreichen jedoch nur weniger befriedigende Schriftplatzierungen. Die Einführung von Einschränkungen (z.B. fixe Beschriftungshöhe und -breite [RBDN05, Mot07]) kann eine akzeptable schnelle Beschriftung und die konfliktfreie Platzierung sehr vieler Beschriftungen ohne Vorberechnungen ermöglichen.

Im NPR spielen externe Beschriftungen eine wichtige Rolle, da sie in klassischen Illustrationen (vgl. [PW10]) Verwendung finden und die wichtigen darzustellenden Objekte frei von Beschriftungen halten. Dabei werden die zentral gelegenen Objekte von den zugehörigen Beschriftungen umgeben. Werden zunächst nur kleinere Textfenster in die Illustration integriert [SCS04], gelingt es ALI et al. [AHS05] schließlich, einzelne Beschriftungen in Echtzeit zu platzieren und dabei verschiedene Beschriftungslayouts der

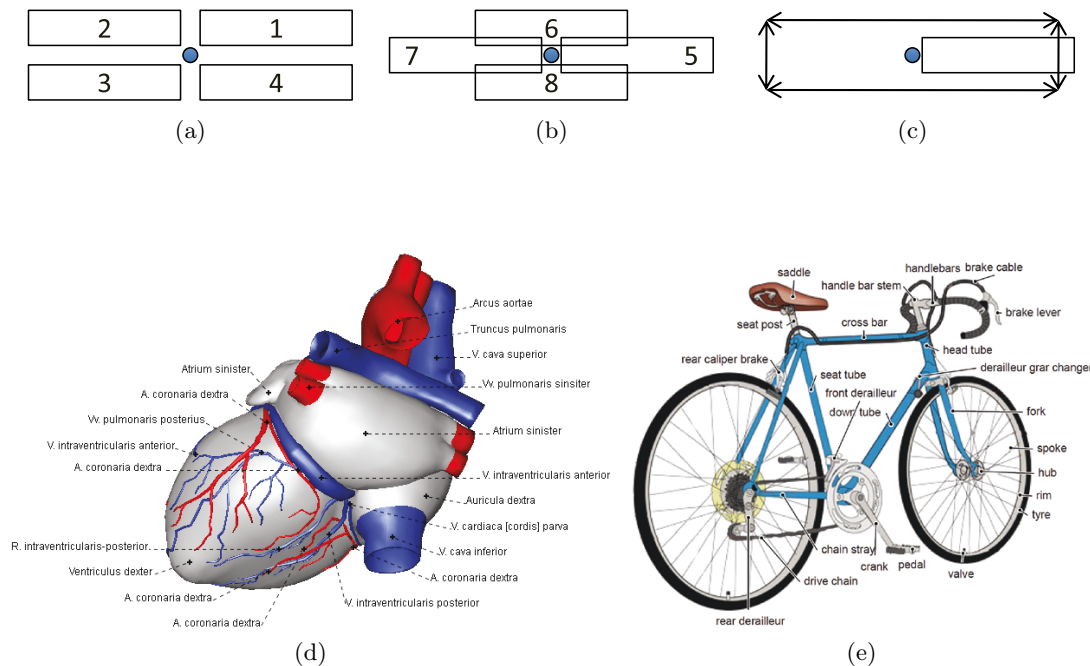


Abbildung 2.9.: Schriftpositionmodelle und Beispiele für Beschriftungsverfahren. Es sind die Positionen des 4-Positionen-Modells (a), die Positionen 5–8 des 8-Positionen-Modells (b) und die möglichen Positionen des 4-*Slider*-Modells (c) dargestellt. Die Zahlen spiegeln die Rangfolge der Beschriftungspositionen wieder (siehe [CMS95]). Die Abbildungen (d) und (e) zeigen externe Beschriftungen in Illustrationen mit Layoutoptimierung (d) und Platzoptimierung (e). Bei Letzterem kann es zur Überschneidung von Linien und Beschriftungen kommen (aus [Ali09]).

Illustration nachzubilden. Dieses Verfahren wird in verschiedenen Illustrationssystemen (z.B. [Li08], siehe Abb. 2.8) angewendet und wurde um weitere Aspekte – wie etwa dem Zusammenfassen von Beschriftungen [GHS06] oder der Beschriftung sich bewegend der Objekte [GHS07] – erweitert. Daneben ist die Beschriftung aber auch mittels einer Multi-Kriterien-Optimierung, die verschiedene Randbedingungen eines gewünschten Layouts berücksichtigt, möglich [ČB10]. Die Echtzeitfähigkeit wird im NPR zum Teil durch die zentrale Anordnung der zu beschriftenden Objekte – das Problem lokaler Minima kann so umgangen werden –, eine geringe Anzahl platzierter Beschriftungen oder den Verzicht auf eine Optimierung erreicht. GÖTZELMANN [Göt08] und ALI [Ali09] geben ausführliche Übersichten zu Beschriftungsverfahren speziell im NPR.

Beschriftungsverfahren werden in der vorliegenden Arbeit genutzt, um die Kommunikation visualisierter Daten durch das Bereitstellen zusätzlicher Informationen zu unterstützen (vgl. Kap. 5).

2.3. Illustrative Visualisierung

2.3.1. Begriffsklärung

Das Ziel der illustrativen Visualisierung besteht in einer verbesserten Kommunikation der in den Datenmengen enthaltenen Informationen. Dafür werden gegenüber den ursprünglich verwendeten Visualisierungstechniken zusätzlich NPR-Verfahren und Illustrationsprinzipien angewendet. Zu Letzterem zählt an erster Stelle die visuelle Trennung wichtiger und weniger wichtiger Informationen mit Hilfe der Abstraktion. Dies ist eine grundlegende Voraussetzung der illustrativen Visualisierung (siehe [BHI⁺05]). Diese Trennung lässt sich allerdings auch in „klassischen“ Visualisierungsverfahren finden – beispielsweise mit den so genannten *degree-of-interest*-Funktionen (DOI – siehe [Fur86]) und dem damit verbundenen Prinzip des *Fokus & Kontext*. RAUTEK et al. stellen schließlich die These auf, dass die Visualisierung als solche lediglich eine Fortsetzung der wissenschaftlichen Illustration ist und dass die *illustrative Visualisierung* somit lediglich explizit auf etablierte handwerkliche Verfahren zurückgreift [RBGV08]. Deshalb sollen an dieser Stelle die Eigenschaften der *illustrativen Visualisierung* zusammengefasst werden:

- Ausgangspunkt ist eine Visualisierungstechnik bzw. ein Verfahren, das durch Anwendung von NPR-Methoden modifiziert wird mit dem Ziel, die Kommunikation enthaltener Informationen zu unterstützen (vgl. [RBGV08, S.2]).
- Hierfür werden die dargestellten Bildinhalte – im Wesentlichen die zu visualisierenden Daten – bezüglich ihrer aktuellen Bedeutung beurteilt, um eine entsprechende visuelle Trennung von wichtigen und weniger relevanten Bildinformationen vorzunehmen. So können wichtige visuelle Repräsentanten hervorgehoben und mit zusätzlichen Detailinformationen angezeigt werden; die weniger wichtigen Elemente können visuell deakzentuiert werden.

Gemäß RAUTEK et al. stellt das NPR die Methoden zur visuellen Trennung als so genannte „*low-level abstraction*“ [RBGV08, S.3] bereit – also Möglichkeiten *wie* die Darstellung beeinflusst werden kann. Die ebenfalls benannte „*high-level abstraction*“ befasst sich damit *was* dargestellt werden soll. Diese Beurteilung der Daten bezüglich ihrer Relevanz kann das NPR jedoch nicht bedienen und muss dementsprechend zusätzlich von außen eingebracht werden. In der Illustration erfolgt die genannte Bewertung etwa durch den Illustrator bzw. dessen Auftraggeber und durch Kenntnisse etwa über funktionale Zusammenhänge (z.B. mittels einer so genannten *Partonomic*-Struktur, vgl. [Čmo11]). Das Wissen über die Wichtigkeit der Informationen liegt also bereits vor der Anwendung illustrativer Methoden vor. In bisher veröffentlichten Arbeiten zur illustrativen Visualisierung verhält es sich ähnlich: Bevor illustrative Methoden zum Einsatz kommen, ist bereits bekannt, welche Daten als wichtig gelten und daher vorrangig kommuniziert werden müssen. Die illustrative Visualisierung dient damit in erster Linie der Präsentation wichtiger Daten (siehe [RBGV08]), und weniger der explorativen oder konfirmativen Analyse unbekannter Daten (siehe [SM00]).

2.3.2. Methoden zur Bestimmung der relevanten Daten

Die Spezifikation und Berücksichtigung derjenigen Daten, die in einer Visualisierung als wichtig zu erachten sind, gewinnt im Bereich der Visualisierung zunehmend an Bedeutung. Grund hierfür sind die ständig zunehmenden Datenmengen, deren herkömmliche Visualisierung den Nutzer kognitiv überfordern kann: Trotz steigender Anzahl visualisierter Daten, kann die Menge kommunizierter Informationen abnehmen – ein Teilaspekt des *Visual Clutters*. Für die angesprochene Beurteilung der Datenrelevanz existieren verschiedene Ansätze die hier auszugsweise wiedergegeben werden.

Ein verbreitetes Verfahren, Daten als relevant zu kennzeichnen besteht darin, dem Nutzer diese Option mittels Interaktionstechniken einzuräumen. Dabei spielen die Selektion und die Filterung eine wichtige Rolle: Die Daten, die vom Nutzer direkt oder indirekt gewählt werden, können im weiteren Verlauf des Visualisierungsprozesses als wichtig erachtet und dementsprechend hervorgehoben werden. Diese Herangehensweise wird etwa von WILLS [Wil96] ausführlich betrachtet. Ausgehend von einer nutzergesteuerten Auswahl ist es mit Hilfe der bereits erwähnten *degree-of-interest*-Funktionen (siehe [Fur86]) ferner möglich, die Wichtigkeit der weiteren Daten zu beurteilen (siehe beispielsweise [Kei96]). Die Interaktion – insbesondere die Selektion und Filterung – verlieren aber an Effizienz, wenn die Datenmenge zu groß wird: Die einzelnen visuellen Repräsentanten sind schwerer voneinander zu trennen, schwerer zu selektieren und es steigt die Wahrscheinlichkeit, dass wesentliche – und somit zu selektierende – Daten durch *Visual Clutter* verdeckt werden. Ebenso steigt der Aufwand bei der Filternutzung (Präzision, weitere Filter), um eine entsprechend trennende Wirkung zu erzielen.

Deshalb wird beispielsweise versucht, die Interaktion mit großen oder komplexen Datenmengen zu erleichtern (z.B. direkte Auswahl komplex geformter Teilmengen in Scatterplots [CCM10]). Ein weiterer Ansatzpunkt besteht darin, den Interaktionsaufwand zu reduzieren [Lam08] und mittels Automatismen eine Vorauswahl für den Nutzer zu treffen. Dabei werden vornehmlich zwei Ausgangspunkte gewählt: Entweder der Nutzer der Visualisierung oder die Daten. Im ersten Fall werden etwa die Aufgaben des Nutzers sowie die hierfür notwendigen Handlungsabläufe und Fähigkeiten berücksichtigt (z.B. [AES05, TFS08b, LKZ09, Mun09a, PW09, Fuc11]). Ebenso ist es möglich, aus Aufzeichnungen Rückschlüsse auf die Präferenzen des Nutzers zu gewinnen. Mit den genannten Angaben können unter anderem Nutzerprofile erstellt werden, mit denen wiederum Visualisierungssysteme entsprechend vorkonfiguriert werden (z.B. [AB09]). Die Analyse des Nutzerverhaltens, seiner Aufgaben und seiner Interessen wird unter anderem im Forschungsgebiet *Human-Computer-Interaction* betrachtet.

Beim datengetriebenen Ansatz werden die Daten vor allem mit Methoden des *Data-Mining* analysiert, mit dem Ziel, die in den Daten enthaltenen relevanten Informationen zu extrahieren. Als einfaches Beispiel ist die Detektion von Ausreißern, Extremwerten oder Korrelationen zu nennen. Infolge der Diversität der Daten und der Aufgaben des Nutzers, ist es nicht möglich, immer genau *die* relevanten Informationen zu finden, sondern lediglich den Nutzer auf besondere – ihn möglicherweise interessierende – Eigenschaften hinzuweisen (z.B. [GST13]).

Die angesprochenen Ansätze und deren Kombination werden im Forschungsbereich *Visual Analytics* zusammengeführt. Obwohl die Datenbewertung Voraussetzung für eine illustrative Visualisierung ist, bildet sie keinen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Die Dissertation folgt damit den meisten bisherigen Publikationen zur illustrativen Visualisierung. Deshalb wird im Weiteren nur dann auf nutzbare Möglichkeiten zur Wichtigkeitsbestimmung eingegangen, wenn dies im direkten Zusammenhang mit den neu entwickelten Ansätzen steht.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst illustrative Verfahren aus der Volumenvisualisierung (Kap. 2.3.3) und der Strömungsvisualisierung (Kap. 2.3.4) zusammengefasst, die den Nutzen des *illustrativen* Ansatzes belegen. In Kapitel 2.3.5 werden schließlich existierende Verfahren der Informationsvisualisierung vorgestellt, die sich der illustrativen Visualisierung zuordnen lassen.

2.3.3. Volumendaten

Illustrative Verfahren in der Volumenvisualisierung beschäftigen sich primär mit der Sichtbarkeit und besseren Differenzierbarkeit der verschiedenen durch die Volumendaten beschriebenen Strukturen. Hierbei spielen vor allem die freilegenden Darstellungstechniken sowie Verfahren zur Akzentuierung und Deakzentuierung eine wesentliche Rolle. In fast allen Publikationen wird eine bereits erfolgte Bewertung der Daten vorausgesetzt. In der Volumenvisualisierung werden hierfür in erster Linie Segmentierungsverfahren eingesetzt, deren Ergebnisse oft manuell nachbearbeitet werden.

2.3.3.1. Freilegende Darstellungen

Klassische Verfahren der Volumenvisualisierung weisen in der Regel das Problem auf, innere Strukturen nur schwer sichtbar machen zu können. Handelt es sich bei diesen Strukturen um die wesentlichen zu kommunizierenden Informationen, so sinkt hierdurch die Effektivität der Darstellung. Eine offensichtliche Verbesserung tritt also ein, wenn diese Strukturen sichtbar gemacht werden können. VIOLA und GRÖLLER [VG05] fassen verschiedene in der Volumenvisualisierung genutzte illustrative Ansätze für eine verbesserte Sichtbarkeit zusammen: So werden etwa Blickpunkt abhängige Transparenzen genutzt – angelehnt an Phantom- und Schnittzeichnungen – um innere Strukturen sichtbar zu machen [VKG05, BGKG05]. BRUCKNER et al. [BGKG06] koppeln die Erzeugung der Phantomzeichnungen schließlich vom Blickpunkt ab und machen sie mit entsprechenden Interaktionsmöglichkeiten intuitiv steuerbar. Die Arbeit von LI et al. [LRA⁺07] fokussiert zwar die Illustration, die erzeugten Schnittzeichnungen können bei vollständig segmentierten Volumendaten aber auch in der Volumenvisualisierung angewendet werden.

MCGUFFIN et al. nutzen erstmals eine räumliche Dekomposition von Volumendaten, um innere Strukturen in den Volumendaten sichtbar zu machen [MTB03]. Verschiedene Ansätze wie beispielsweise das *Peeling* bilden schließlich den Ausgangspunkt für die Nutzung von Explosionszeichnungen in der Volumenvisualisierung [BG06]. Verdeckende Daten werden mit Hilfe eines Federkraftmodells geordnet aus der Sichtachse bewegt und

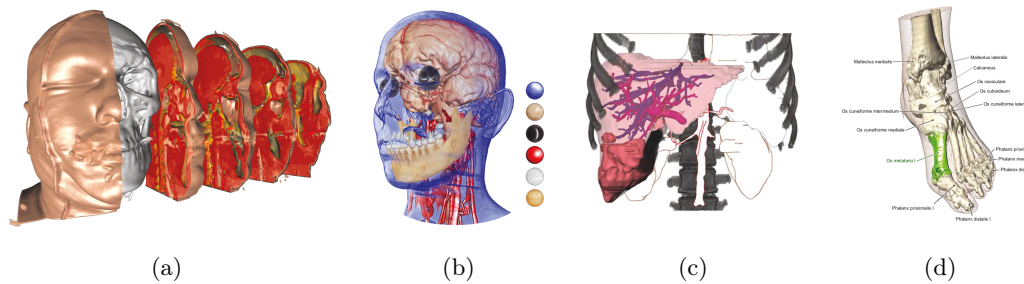


Abbildung 2.10.: Beispiele der illustrativen Volumenvisualisierung. Mit Explosions- und Phantomzeichnungen werden innere Strukturen eines Volumendatensatzes in ihrem Kontext sichtbar dargestellt (a)(b)(d). Mit *Style Transfer Functions* können den verschiedenen Strukturen leicht unterschiedliche Stile zugeordnet werden, um deren Differenzierbarkeit zu unterstützen (b). Außerdem kann ein deakzentuierter Kontext den Fokus in der Regel auf die relevanten Strukturen lenken (c). Deren Identifikation lässt sich etwa mit Beschriftungen unterstützen (d). Aus [BG06, BG07b, TIP05, BG05] (v.l.n.r.).

geben somit die inneren Strukturen frei. Die Volumendaten können mittels eines Ähnlichkeitsmaßes auch automatisch aufgespalten werden [RVB⁺08]. Zudem sei der entsprechende Ansatz von Li et al. aufgeführt, da die beschriebene automatische Generierung von Explosionszeichnungen auch auf Volumendaten anwendbar ist und automatisch die korrekte Dekompositionsreihenfolge inklusive nötiger Subexplosionen definiert [LACS08].

2.3.3.2. Akzentuierung und Deakzentuierung

Selbst wenn relevante Strukturen nicht verdeckt werden, ist es mitunter schwer, diese in der Visualisierung auszumachen. Gerade im medizinischen Umfeld, müssen relevante Strukturen vollständig wahrgenommen und identifiziert werden. Dementsprechend werden diese Strukturen hervorgehoben, Kontextinformationen unterdrückt oder gar zusätzliche Detailinformationen in die Visualisierung eingebracht. So adressiert *INTERANTE* etwa die verbesserte Wahrnehmung von Oberflächeneigenschaften [Int97]. Zur Umsetzung des genannten Zieles werden aber auch weitere NPR-Verfahren (Silhouetten... , [ER00]) und so genannte *Streamlines* [LMP13] genutzt. Die von LU et al. vorgestellte Anwendung von Punktzeichnungen [LMT⁺03] adressiert unter Anderem das Hervorheben einzelner Dateneigenschaften. Dieses Ziel wird auch mit der Nutzung von *Feature-Halos* verfolgt [SE03]. Verschiedene der angesprochenen Ansätze werden schließlich kombiniert, um eine bestmögliche Unterstützung bei der Operationsplanung durch eine visuelle Trennung der Strukturen zu erreichen [TIP05]. Die Verknüpfung verschiedener Stile mit den jeweiligen Strukturen wird erheblich durch so genannte *Style Transfer Functions* erleichtert [BG07b]. Die Anwendung von Halos unterstützt dabei etwa die visuelle Trennung wichtiger und weniger wichtiger Strukturen [BG07a]. Für Detailinformationen wird unter anderem auf Ausschnittsvergrößerungen und Beschriftungen zurückgegriffen (siehe [BG05]).

Die hier aufgeführten Ansätze stellen nur einen Ausschnitt existierender Publikationen aus dem Bereich der illustrativen Volumenvisualisierung dar. Diese und noch weitere Verfahren, führen zu verbesserten Volumenvisualisierungen. In Abbildung 2.10 werden abschließend einige Ergebnisse der illustrativen Volumenvisualisierung dargestellt, die den Nutzen der illustrativen Methoden verdeutlichen.

2.3.4. Strömungsdaten

In der Strömungsvisualisierung können sehr komplexe – zum Teil über die Zeit veränderliche – Verläufe der Strömungslinien die effiziente Analyse der Daten erschweren. Aus diesem Grund wird mit illustrativen Verfahren versucht, diese Linien visuell besser voneinander zu separieren und die Entnahme besonderer Strömungseigenschaften zu erleichtern. Die Bestimmung relevanter Daten erfolgt in der Strömungsvisualisierung primär über Interaktionstechniken aber auch über die automatische Detektion spezieller Strömungseigenschaften (z.B. kritische Punkte).

Die visuelle Trennbarkeit dreidimensionaler Strömungslinien wird durch INTERANTE und GROSCH mittels Halos erleichtert [IG97]. Diese Methode wird auch in späteren Veröffentlichungen der Strömungsvisualisierung genutzt (z.B. [MTHG03]) und für eine bessere Tiefenwahrnehmung der Strömungslinien weiter angepasst (z.B. [EBRI09]). Neben der Verwendung von Halos werden die Strömungslinien auch selbst für die Hervorhebung spezieller Strömungseigenschaften und somit für die Kommunikation zusätzlicher Detailinformationen genutzt [SGS05b]. Dazu wird, ähnlich den bei *Strokes* bekannten *Line Styles*, das Aussehen der Strömungslinien entlang ihres Verlaufes modifiziert (siehe auch [EBRI11]). Außerdem werden Strömungslinien verwendet, die an *Pen-and-Ink*-Illustrationen angelehnt sind und exemplarisch die Ablesbarkeit der Feldstärke [TB96] oder die Wahrnehmbarkeit der Strömungslinien in der zweidimensionalen Projektion der 3D-Daten [LS07a] verbessern. Mit den von HSU et al. beschriebenen Methoden [HMCM09], werden verschiedene Momentaufnahmen eines über die Zeit variierendes Strömungsfeldes dargestellt – ein Verfahren das an Explosionsdarstellungen angelehnt ist und als *fanning in time* bezeichnet wird (siehe [GBKG04]). BORN et al. [BWF⁺10] gelingt die anschauliche Darstellung sehr spezieller Verwirbelungen mit Hilfe von Strömungsbändern, deren Verlauf erst durch die illustrative Darstellung klar entnommen werden kann (etwa durch *Dithering*, siehe Abb. 2.11(c)). Neben der reinen Visualisierung ist es aber auch möglich, die illustrative Strömungsvisualisierung im Bildraum zu manipulieren (z.B. die Dichte der Strömungslinien), um Strömungseigenschaften hervorzuheben oder zu deakzentuieren [SCK10]. Auf diese Weise ist eine einfache Anpassung an den Zweck der Präsentation möglich.

Neben der Darstellung von Strömungslinien werden mitunter so genannte *Schlierendarstellungen* oder auch *Schattengraphen* für die Visualisierung von Strömungen genutzt. Auch für diese existieren illustrative Erweiterungen, mit denen sich spezielle Strömungseigenschaften besser entnehmen lassen (siehe [SJEG05]).

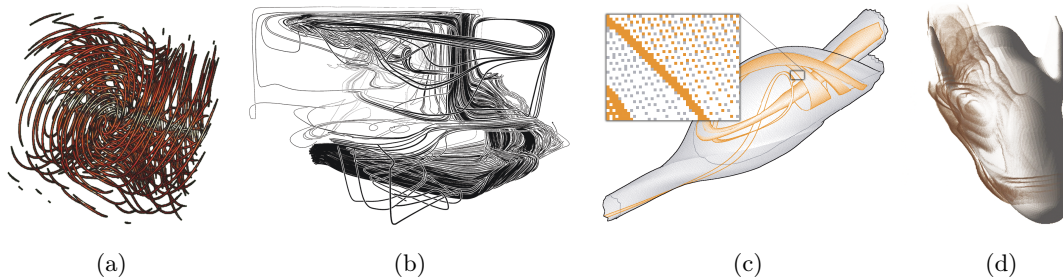


Abbildung 2.11.: Beispiele der illustrativen Strömungsvisualisierung. Halos werden in der Strömungsvisualisierung genutzt, um die Differenzierbarkeit der Strömungslinien zu unterstützen (a). Eine angepasste Parametrisierung der Halos fördert zudem die Tiefenwahrnehmung (b). Mit der illustrativen Darstellung von Strömungsbändern (c) und illustrativen Schlierendarstellungen (d) lässt sich der Verlauf komplexer Strömungen nachvollziehbar darstellen. Aus [MTHG03, EBRI09, BWF⁺10, SJEG05] (v.l.n.r.).

Die aufgeführten Verfahren stellen erneut nur einen Ausschnitt der illustrativen Strömungsvisualisierung dar. BRAMBILLA et al. geben einen umfassenden aktuellen Überblick zu diesem Forschungsgebiet [BCP⁺12]. Nichtsdestotrotz zeigen die obigen Arbeiten bereits, dass sich die Kommunikation von Informationen in der Strömungsvisualisierung mit Hilfe illustrativer Verfahren unterstützen lässt. Abbildung 2.11 verdeutlicht etwa die gesteigerte visuelle Trennbarkeit von Strömungslinien in illustrativen Visualisierungen.

2.3.5. Abstrakte Daten

Es gibt nur wenige aktuelle Arbeiten, die dem Feld einer illustrativen Informationsvisualisierung zugeordnet werden können. Allerdings existieren ältere Ansätze, bei denen dies aus heutiger Sicht möglich wäre. Das liegt unter anderem daran, dass die Informationsvisualisierung relativ viele Freiheiten im *Mapping* zulässt und so wurden schon frühzeitig Verfahren aus anderen Bereichen in die Informationsvisualisierung übernommen. Gemäß RAUTEK et al. ist etwa das für die Informationsvisualisierung wichtige Prinzip des *Fokus & Kontext* eng mit dem oben beschriebenen illustratorischen Prinzip der Abstraktion verknüpft und ein wichtiges Mittel der illustrativen Visualisierung [RBGV08]. Entsprechende Ansätze zur *ungleichen Verteilung visueller Ressourcen* (siehe [Hau05]) wie *Semantic Depth of Field* [Kos01] oder Verzerrungs- und Linsentechniken (z.B. [CCF97, WB04]) lassen sich der illustrativen Informationsvisualisierung zuordnen [RBGV08].

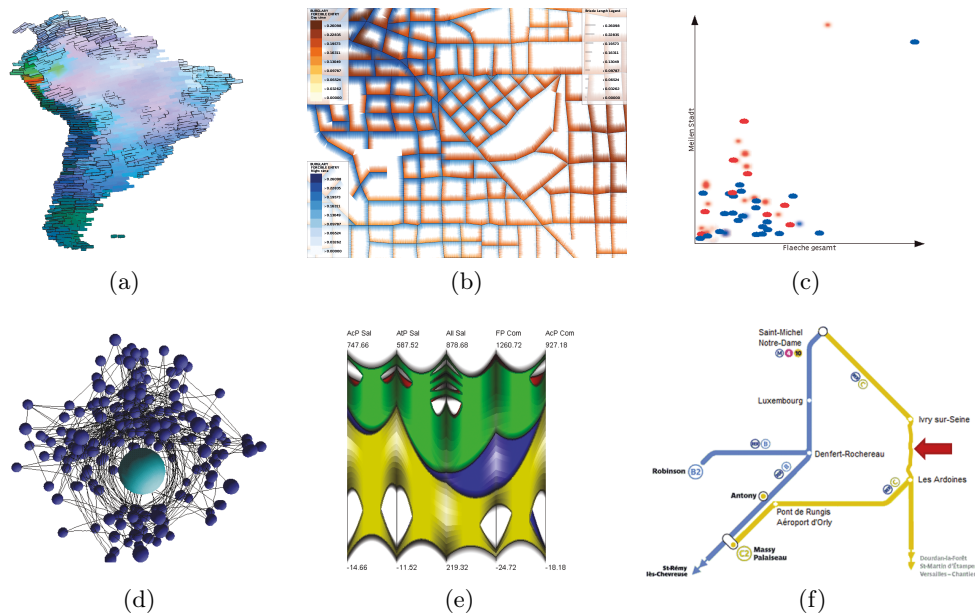
Neben derartigen Verfahren der Informationsvisualisierung, die nachträglich der illustrativen Visualisierung zuordbar sind, gibt es nur wenige neuere Verfahren, die explizit auf NPR-Methoden zurückgreifen. Hierzu zählen unter anderem Arbeiten von HEALEY et al., die die Möglichkeiten der *Stroke*-Parametrisierung nutzen, um die Visualisierung von Multiparameterdaten auf Landkarten zu unterstützen [Hea01, HTER04, THE07]. Ähnlich werden Pinselborsten von KIM et al. [KMM⁺13] und ISENBERG [Ise13] genutzt.

Des Weiteren wird von WATERS und JANKUN-KELLY die Nutzung von Halos und der *Aerial Perspective* vorgeschlagen, um relevante Linien beispielsweise in Graphvisualisierungen besser verfolgen zu können [WJK06]. Eine ausführliche Betrachtung von Halos erfolgte im Rahmen dieser Dissertation in [LS08b]. Mittlerweile finden Halos auch in pixelbasierten Visualisierungen zur Hervorhebung relevanter Daten Anwendung [OJS⁺11]. Sie werden neben künstlich erzeugten Schatten, Silhouetten und *Edge-Bundling*-Methoden auch in den *Illustrative Parallel Coordinates* [MM08] genutzt, um visualisierte Cluster allgemein besser voneinander trennen zu können. Zu diesem Zweck wurde zudem eine alternative Blendfunktion für Transparenzen vorgestellt [WGM⁺08].

Auch Beschriftungen gelten als wichtige illustrative Elemente. Hier sollen nur jene Beschriftungsverfahren zusammengefasst werden, die im Kontext der Informationsvisualisierung entwickelt wurden. Neben einfachen Ansätze wie dem *Tool-Tip-Labeling* oder *Label-What-You-Can* wird mit dem *Excentric Labeling* ein leistungsfähigeres lokales Beschriftungsverfahren vorgestellt [FP99]. Es bringt abhängig von einer frei beweglichen Selektionslinse externe Beschriftungen im unmittelbarem Kontext der Linse an. Dieser Ansatz wurde später mit weiteren Selektionsmechanismen der Linse angereichert [BRL09]. MOTE ermöglicht mit seinem Ansatz die schnelle globale Beschriftung im Umfeld der Informationsvisualisierung – setzt hierfür jedoch konstante Beschriftungsdimensionen (Höhe und Breite) voraus [Mot07]. Dieser Ansatz beschäftigt sich zudem mit der fehlenden *Frame-to-Frame*-Kohärenz nacheinanderfolgender Beschriftungslösungen: Durch die spontane Beschriftung auf verschiedenen Zoomstufen und entsprechendes Überblenden wird das plötzliche Erscheinen bzw. Verschwinden von Beschriftungen (Engl.: *Popping*) abgemildert.

Schließlich seien die neueren Arbeiten von WOOD et al. [WII⁺12] und BOUKHELIFA et al. [BBIF12] genannt, die die Skizzenhaftigkeit von Handzeichnungen nachahmen und nutzen. In den benannten Publikationen wird festgestellt, dass sich durch die Skizzenhaftigkeit etwa die Einstellung des Nutzer zur Visualisierung positiv beeinflussen lässt und sich im gewissen Rahmen Unsicherheiten visualisieren lassen. Dies wurde auch im Rahmen der vorliegenden Dissertation vorgeschlagen (vgl. [LRS10b]).

In Abbildung 2.12 werden abschließend einige Bilder gezeigt, die der illustrativen Informationsvisualisierung zugeordnet werden können. Im Vergleich zu den vielfältigen Ansätzen der illustrativen Volumen- und Strömungsvisualisierung wurde eine illustrative Informationsvisualisierung bisher kaum betrachtet. Dies wird besonders deutlich, wenn die hier aufgeführten Ansätze mit der Anzahl sonstiger Publikationen der Informationsvisualisierung ins Verhältnis gesetzt werden. Auch in Tutorials (z.B. [GPE⁺05, VGB⁺05, ESB⁺06, VBS⁺07]), in Paneldiskussionen (z.B. [BHI⁺05, LGH⁺09]) und in speziellen Journalausgaben zur illustrativen Visualisierung (z.B. [VHE10]) ist die Informationsvisualisierung als Anwendungsgebiet illustrativer Verfahren bisher kaum oder gar nicht vertreten.



Abbildungung 2.12.: Verschiedene Ansätze die der illustrativen Informationsvisualisierung zugeordnet werden können. In (a) und (b) werden die Eigenschaften von Pinselstrichen zur Visualisierung genutzt. In (c) wird durch Verwischen eine visuelle Trennung der visuellen Repräsentanten bewirkt. Überlagerte visuelle Repräsentanten können etwa durch Verzerrungen freigelegt werden (d). In (e) unterstützen Halos die Differenzierbarkeit verschiedener Cluster in Parallelen Koordinaten. Schließlich lassen sich mit skizzenhaften Linien auch Unsicherheiten visualisieren (f). Aus [THE07, KMM⁺13, Kos01, CCF97, MM08, BBIF12] (v.l.n.r.).

2.4. Zusammenfassung

Das vorliegende Kapitel behandelte wichtige Grundlagen der Informationsvisualisierung und des NPRs, die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit wichtig sind. Es zeigte, wie sich diese Bereiche abgrenzen und mit welchen Modellen sie sich beschreiben lassen. Ferner wurde in den Bereich der illustrativen Visualisierung eingeführt. Es wurde dargestellt, dass sich dieser primär damit beschäftigt, *wie* relevante Informationen dargestellt werden können, um hierdurch gezielt die Kommunikation dieser Informationen zu unterstützen. Die illustrative Visualisierung und auch die vorliegende Arbeit beschäftigen sich nur am Rande damit, *welche* Informationen auf diese Weise gesondert zu behandeln sind.

In diesem Kapitel wurden Gütekriterien vorgestellt, die eine qualitative Beurteilung der visuellen Repräsentation hinsichtlich ihrer Aussagekraft erlauben. Mit der Problembeschreibung zur Vermeidung des *Visual Clutters* wurde ferner das Ziel einer verbesserten Kommunikation relevanter Informationen aufgegriffen. Als eine Möglichkeit, diese relevanten Informationen festzulegen, wurden außerdem Interaktionsverfahren zusam-

menfassend dargestellt. Für die gezielte Kommunikation derartiger Informationen wird im NPR auf das illustratorische Prinzip der Abstraktion zurückgegriffen, das ebenfalls kurz beschrieben wurde. Hierbei wurde verdeutlicht, dass die Akzentuierung, die Deakzentuierung und das Bereitstellen zusätzlicher Detailinformationen von Bedeutung sind. Außerdem wurde der Stand der Forschung dargelegt.

Das Ziel dieser Arbeit – eine illustrative Informationsvisualisierung – ist ein Teilbereich der illustrativen Visualisierung. Die Erfolge in der illustrativen Volumen- und Strömungsvisualisierung einerseits und andererseits die fehlenden systematischen Betrachtungen in der illustrativen Informationsvisualisierung bilden die wesentliche Motivation dieser Arbeit. Sie soll das NPR und die Informationsvisualisierung zusammenführen und zeigen, dass eine illustrative Informationsvisualisierung prinzipiell möglich ist. Zu diesem Zweck erfolgt im nachfolgenden Kapitel 3 eine ausführliche Betrachtung hinsichtlich der Kombinationsmöglichkeiten von NPR und Informationsvisualisierung mittels der in den Abbildungen 2.2 und 2.4 vorgestellten Modelle. Hierbei wird ein neues erweitertes Modell für die illustrative Informationsvisualisierung entwickelt. Es ermöglicht die Einordnung sowohl bestehender Ansätze als auch der in den Kapiteln 4–6 neu entwickelten Lösungen.

3. Zusammenführung des NPRs und der Informationsvisualisierung

Das vorliegende Kapitel untersucht zunächst systematisch, wie sich die Methoden aus der Informationsvisualisierung und dem NPR kombinieren lassen. Dazu werden die beiden Bereiche auf der Basis etablierter Modelle zusammengeführt. Als wichtiger Beitrag dieses Kapitels wird ausgehend von der untersuchten Kombination das *erweiterte Data-State-Referenzmodell* für die illustrative Informationsvisualisierung entwickelt.

3.1. Konzeptuelle Untersuchung

Existierende Verfahren, die sich einer illustrativen Informationsvisualisierung zuordnen lassen, stellen bisher Einzellösungen dar. Das Ziel dieser Arbeit ist es jedoch, den Ansatz der illustrativen Informationsvisualisierung zu verallgemeinern. Aus diesem Grund werden nachfolgend die Kombinationsmöglichkeiten von NPR und Informationsvisualisierung auf konzeptueller Ebene untersucht.

Um in dieser Arbeit keine Einschränkung bezüglich einzelner Techniken vorzunehmen, werden nachfolgend zunächst die Bereiche Informationsvisualisierung und NPR zusammengeführt. Dafür wird auf zwei allgemeingültige Ansätze zurückgegriffen, die zum Einen eine allgemeine Beschreibung der Verfahren der Informationsvisualisierung und zum Anderen eine allgemeine Beschreibung der NPR-Methoden bereitstellen:

- ▷ **Informationsvisualisierung** CHI und RIEDLS Data-State-Referenzmodell lässt sich als Modell der Informationsvisualisierung nutzen, da sich Visualisierungstechniken als Kombination der hierin enthaltenen frei wählbaren Operatoren und Zustände beschreiben lassen. Die vier modifizierbaren Zustandsoperatoren (Z_W , Z_A , Z_V , Z_B) und die drei modifizierbaren Transformationsoperatoren (T_F , T_M , T_R) ergeben sieben Möglichkeiten, den Visualisierungsprozess zu beeinflussen (s. Abb. 2.2 auf S.9).
- ▷ **NPR** Zur Beschreibung der NPR-Verfahren lassen sich die vier von HALPER et al. und SCHLECHTWEIG identifizierten Bereiche (Modellmanipulationen, Bildmanipulationen, zusätzliche Grafikprimitive, zusätzliche Transformationen) sowie deren wechselseitige Beziehungen als grundlegendes Modell verwenden. Sämtliche NPR-Verfahren lassen sich als Kombination dieser NPR-Bereiche inklusive entsprechender Manipulationen und Transformationen beschreiben.

Die genannten Modelle erlauben durch ihre Mächtigkeit eine konzeptuelle Zusammenführung und Verknüpfung der Methoden der Informationsvisualisierung und des NPRs.

	Z _W	T _F	Z _A	T _M	Z _V	T _R	Z _B
Bildmanipulationen (BM)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zusätzliche Grafikprimitive (ZG)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Modellmanipulationen (MM)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zusätzliche Transformationen (ZT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung 3.1.: Potentielle Kombinationsmöglichkeiten des NPRs und der Informationsvisualisierung. Das Data-State-Referenzmodell bietet sieben Optionen in den Visualisierungsprozess einzugreifen: Die vier Zustandsoperatoren (beige) und die drei Transformationsoperatoren (grün). Zusammen mit den vier NPR-Bereichen ergeben sich 28 zu untersuchende Kombinationsmöglichkeiten.

Die weitreichende Flexibilität des Data-State-Referenzmodells ermöglicht es prinzipiell, jeden NPR-Bereich in jedem Zustands- bzw. Transformationsoperator des Data-State-Referenzmodells anzuwenden und umzusetzen. Durch die sieben Operatorklassen in der Informationsvisualisierung einerseits und die vier NPR-Bereiche andererseits ergeben sich 28 verschiedene Ansatzpunkte für eine Kombination von Methodiken (siehe Abb. 3.1). Allerdings führen die Charakteristika der NPR-Bereiche (siehe Kapitel 2.2.1) zu Einschränkungen und so ist nicht jeder NPR-Bereich in jeder Stufe des Data-State-Referenzmodells nutzbar. Bildmanipulationsverfahren können etwa nur angewendet werden, wenn im Visualisierungsprozess Bilddaten zur Verfügung stehen. So stellt sich die Frage, an welcher Stelle des Visualisierungsprozesses welche NPR-Bereiche eingebunden werden können.

Neben einer möglichen Anwendbarkeit muss auch das Ziel der Anwendung betrachtet werden. So liegt der Nutzungszweck der NPR-Verfahren in dieser Arbeit darin, die Kommunikation von (relevanten) Informationen in der Informationsvisualisierung zu unterstützen – also einer illustrativen Informationsvisualisierung. Dies gelingt aber nur, wenn auch die Bedingungen der Informationsvisualisierung, etwa deren Gütekriterien, berücksichtigt werden. Deshalb muss betrachtet werden, ob sich möglicherweise auch seitens der Informationsvisualisierung Beschränkungen in der Anwendung der NPR-Verfahren ergeben. Gerade das Ziel der *illustrativen* Informationsvisualisierung legt bestimmte Grenzen bezüglich ihrer Anwendungsbereiche im Data-State-Referenzmodell fest.

Dieses Kapitel geht den benannten Problemstellungen nach und stellt dar, in wie weit Verfahren der NPR-Bereiche im Data-State-Referenzmodell eingesetzt werden können. Die nachfolgenden Abschnitte legen dar, welche Möglichkeiten und Grenzen sich bei der Kombination ergeben. So diskutiert der folgende Abschnitt 3.1.1 kurz das Problem der Datenbewertung, als Voraussetzung der illustrativen Visualisierung. Darauf folgend werden in den Abschnitten 3.1.2 – 3.1.5 die vier NPR-Bereiche separat betrachtet und ihre Anwendbarkeit im Data-State-Referenzmodell diskutiert. Dabei ergeben sich für jeden NPR-Bereich primäre und sekundäre Anwendungsgebiete.

3.1.1. Vorbetrachtung

Die Grundlage der illustrativen Visualisierung ist eine Beurteilung der zu visualisierenden Daten bezüglich ihrer Relevanz (siehe Kap. 2.3.1). Diese kann interaktiv oder automatisch erfolgen. Die interaktive Relevanzbewertung kann auf allen Stufen des Data-State-Referenzmodells umgesetzt werden, indem dem Nutzer durch geeignete Operatoren die entsprechenden Möglichkeiten bereitgestellt werden. Für die automatische Relevanzfestlegung müssen entsprechende Operatoren vorliegen, die diese automatischen Berechnungen durchführen. Da im Data-State-Referenzmodell auf allen Stufen (automatische) Operatoren zugelassen sind, ist folglich auch auf allen Stufen eine automatische Relevanzbewertung möglich. Da unterschiedliche Verfahren aber zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, muss hier aber im Vorfeld klar sein, welche Berechnungsmethoden mit welchen Parametrisierungen angewendet werden sollen, um auch die Daten zu liefern, die in einem gegebenen Kontext relevant sind.

Für die interaktive und für die automatische Festlegung der Relevanz können etwa die in Kapitel 2.3.2 zusammengefassten Möglichkeiten genutzt werden. Für die illustrative Informationsvisualisierung ist dabei nicht die konkrete Umsetzung der Relevanzbestimmung entscheidend, sondern der Fakt, *dass* sie durchgeführt wird.

Entsprechende Relevanzwerte vorausgesetzt, wird in den folgenden Abschnitten die Anwendbarkeit der verschiedenen NPR-Bereiche im Data-State-Referenzmodell diskutiert. Um nicht alle 28 Möglichkeiten zu untersuchen, werden nur jene Kombinationen betrachtet, in denen sich die NPR-Bereiche – zum Teil mit Einschränkungen – offensichtlich im Data-State-Referenzmodell nutzen lassen. Dabei ergeben sich für jeden NPR-Bereich primäre und sekundäre Anwendungsgebiete. In diesem Kapitel betrachtet werden

▷ *Bildmanipulationen*

- ▷ auf der Bilddatenebene
- ▷ beim *Rendering*
- ▷ bei der Nutzung von Texturen
- ▷ bei der Visualisierung von Bildersammlungen

▷ *Zusätzliche Grafikprimitive*

- ▷ im Zustand der visuellen Abstraktion
- ▷ während des *Mappings*

▷ *Modellmanipulationen*

- ▷ auf dem geometrischen Modell
- ▷ durch die Anreicherung der Daten
- ▷ während der Modellerzeugung im *Mapping*

▷ *Zusätzliche Transformationen*

- ▷ zwischen zusätzlichen Grafikprimitiven, geometrischem Modell und der Bildebene

	Z _W	T _F	Z _A	T _M	Z _V	T _R	Z _B
Bildmanipulationen (BM)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zusätzliche Grafikprimitive (ZG)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Modellmanipulationen (MM)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zusätzliche Transformationen (ZT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung 3.2.: Schematische Darstellung untersuchter Kombinationen des NPRs und des Data-State-Referenzmodells. Nicht betrachtete Anwendungsoptionen sind abgeblendet.

Die in dieser Arbeit untersuchten Kombinationen sind in Abbildung 3.2 hervorgehoben. Diese Matrix wird in verkleinerter Form am Rand neben dem Text der nachfolgenden Abschnitte dargestellt. Die in dem jeweiligen Abschnitt untersuchten Kombinationen werden dabei durch einen schwarzen Punkt angezeigt.

3.1.2. Bildmanipulationen

	Z _W	T _F	Z _A	T _M	Z _V	T _R	Z _B
BM	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
ZG	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
MM	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
ZT	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Das Illustrationsprinzip der Abstraktion lässt sich als visuelle Trennbarkeit wichtiger und weniger wichtiger Informationen zusammenfassen. Für diesen Zweck können auch Bildmanipulationsverfahren verwendet werden, die auf der einen Seite Hervorhebungen und auf der anderen Seite Abschwächungen von Bildinhalten erlauben. Durch erzeugte Stile und deren Eigenschaften lassen sich auch zusätzliche Informationen in das Bild einbringen (z.B. über die Ausrichtung von Schraffuren u.ä.).

Diese Eigenschaften der Bildmanipulationen lassen sich für eine illustrative Informationsvisualisierung ausnutzen. Allerdings setzt dies eine Ungleichbehandlung verschiedener Bildbereiche voraus: Abschwächende Bildmanipulationen sollen auf weniger wichtigen und hervorhebende auf den wichtigen Bildbereichen durchgeführt werden. Entsprechend müssen eingebrachte zusätzliche Details (z.B. verschiedene Stile, erzeugte Texturen) nur die Kommunikation der relevanten Daten unterstützen. Die visuelle Trennung und die Detailanreicherung sollten sich je nach visualisierten Daten also global (Bild), lokal (Bildbereiche) oder punktuell (Bildpunkte) anwenden lassen.

Bildmanipulationsverfahren setzen für ihre Anwendung zweidimensionale Bilddaten als Eingabe voraus. Derartige Daten liegen in der Regel erst nach dem *Rendering* im Bilddatenzustand vor und so ist die Nutzung von Bildmanipulationsverfahren auf anderen Stufen des Data-State-Referenzmodells nicht ohne weiteres möglich. Hieraus ergibt sich der primäre Anwendungsbereich der Bildmanipulationsverfahren auf Bilddatenebene. Darüber hinaus ergeben sich weitere sekundäre Anknüpfungspunkte, die ebenfalls in den folgenden Abschnitten diskutiert werden.

3.1.2.1. Primär: Auf Bilddatenebene

Die Voraussetzung, dass Bilddaten vorliegen, ist im Data-State-Referenzmodell im Zustand der Bilddaten erfüllt. Deshalb lassen sich Bildmanipulationsverfahren durch eine entsprechende Belegung der Zustandsoperatoren auf der Bilddatenebene umsetzen. Dabei können sämtliche Bildmanipulationsverfahren genutzt werden. Dazu zählen etwa Techniken zur Kantenhervorhebung oder Farbmanipulation aber auch zur Nachahmung von Kunststilen wie Aquarellen durch zelluläre Automaten [Sma91].

Z _W	T _F	Z _A	T _M	Z _V	T _R	Z _B	
○	○	○	○	○	○	●	BM
○	○	○	○	○	○	○	ZG
○	○	○	○	○	○	○	MM
○	○	○	○	○	○	○	ZT

Diese Techniken lassen zunächst nur eine einheitliche Modifikation der gesamten visuellen Repräsentation zu, beispielsweise eine einheitliche Farbmanipulation, eine einheitliche Kantenhervorhebung und so weiter. Dementsprechend sind sie nicht unmittelbar für eine illustrative Informationsvisualisierung nutzbar. Informationen darüber, welche Daten, und damit welche Bildbereiche, relevant sind oder mit Details angereichert werden müssen, liegen in der Regel nicht mehr vor, da mit den *Rendering*-Operatoren die geometrischen Daten in einzelne Bildpunkte umgewandelt werden.

Für die Steuerung der Bildmanipulationen werden im NPR deshalb oft so genannte *Geometric Buffer* (*G-Buffer*) eingesetzt. Diese halten etwa zusätzliche Eigenschaften des geometrischen Modells (z.B. Identitäten: *ID-Buffer*, Tiefenwerte: *Z-Buffer*) in Form spezieller Bilddaten fest. So stehen diese Informationen auch nach dem *Rendering* zur Verfügung und können während der Bildmanipulation etwa der angepassten Parametrisierung dienen. So ist es möglich, dass etwa Objektgrenzen in Mosaiken, Schraffuren, Aquarellen u.ä. sichtbar bleiben oder dass Pinselstriche und Mosaiksteine den Objektformen folgen.

Dieses Konzept lässt sich ohne größeren Aufwand in die Informationsvisualisierung integrieren, da hierfür lediglich die *Rendering*-Operatoren für die Erzeugung der *G-Buffer* angepasst werden müssen. Mittels der *ID-Buffer* lassen sich etwa sämtliche dargestellten visuellen Repräsentanten im Bildraum identifizieren. Genauso können *G-Buffer* die Parameter der Manipulationsverfahren enkodieren und somit eine individuelle Manipulation der visuellen Repräsentanten im Bildraum ermöglichen. Mit dieser Modifikation der *Rendering*-Operatoren sind Bildmanipulationen auf Bildebene also nicht nur global, sondern auch lokal und punktuell nutzbar.

3.1.2.2. Sekundär: Bildmanipulationen während des Renderings

Eine mögliche Alternative zur Bilddatenmodifikation besteht darin, bereits die Bilderzeugung so zu manipulieren, dass die resultierenden Bilddaten bereits entsprechend verändert sind. Eine derartige Manipulation ist ohne vorliegende Bilddaten durchführbar und durch die mittlerweile frei programmierbaren *Renderingpipelines* realisierbar. Viele neuere Arbeiten im NPR nutzen diese Möglichkeiten der Grafikhardware, um Bildmanipulationen zu beschleunigen und bereits im *Rendering* herbeizuführen. So können beispielsweise Schraffuren durch das *Rendering* direkt aus Geometriemodellen erzeugt werden (z.B. [PHMF01]). Das *Rendering* soll deshalb nachfolgend als weitere Möglichkeit zur Bildmanipulation aufgefasst werden.

Z _W	T _F	Z _A	T _M	Z _V	T _R	Z _B	
○	○	○	○	○	○	●	BM
○	○	○	○	○	○	○	ZG
○	○	○	○	○	○	○	MM
○	○	○	○	○	○	○	ZT

Da sämtliche Daten der visuellen Abstraktion den *Rendering*-Operatoren als Eingabe dienen, können alle visuellen Repräsentanten individuell behandelt werden. Dies gestattet punktuelle, lokale und globale Manipulationen der zu erzeugenden Bilddaten. Somit lassen sich illustrative Ziele in den *Rendering*-Operatoren umsetzen. So können beispielsweise hardwarebasierte Schraffuren [PHMF01] genutzt werden, um Bildbereiche schon während deren Erzeugung zu deakzentuieren oder über die hierbei verwendeten *Tonal Art Maps* zusätzliche Detailinformationen im dargestellten Bild zu kodieren.

Einschränkend für die Nutzung der *Rendering*-Operatoren wirken die technischen Gegebenheiten aktueller Grafikkhardware. Diese ist auf eine Parallelverarbeitung der Pixel ausgelegt. Viele Bildmanipulationsverfahren benötigen jedoch eine sequentielle Abarbeitung der Ausgabepixel, um etwa Fehler auf benachbarte Pixel zu verteilen (z.B. beim *Dithering*). Diese Verfahren sind somit nicht mit *Rendering*-Operatoren umsetzbar. Trotz dieser Einschränkung, die zur Einstufung als sekundäres Anwendungsgebiet führt, kann festgehalten werden, dass Bildmanipulationen für illustrative Zwecke im *Rendering* umgesetzt werden können. Hierfür müssen allerdings keine Bilddaten, sondern die entsprechenden geometrischen Daten der visuellen Abstraktion als Eingabe vorliegen.

3.1.2.3. Sekundär: Spezialfall – Texturen

$Z_W \ T_F \ Z_A \ T_M \ Z_V \ T_R \ Z_B$
 BM ○ ○ ○ ○ ● ○ ○
 ZG ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
 MM ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
 ZT ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

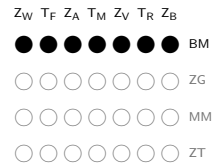
Die Voraussetzung für Bildmanipulationen, kann neben der Bilddatenebene auch dann erfüllt sein, wenn im *Mapping* die visuelle Variable *Textur* genutzt wird. Da Texturen ebenfalls Bilddaten sind, lassen sich Bildmanipulationsverfahren damit auch im Zustand der visuellen Abstraktion umsetzen.

Im Zustand der visuellen Abstraktion sind die Identitäten und die numerischen Parameter für jeden visuellen Repräsentanten bekannt. Somit können Texturen als Teil der visuellen Repräsentanten individuell manipuliert werden. Auf diese Weise sind punktuelle, lokale und globale Bildmanipulationen umsetzbar. Dementsprechend können Bildmanipulationsverfahren auf Texturen der visuellen Trennung und der Detailanreicherung im Sinne einer illustrativen Informationsvisualisierung dienen.

Bei der Überführung der Texturen aus der visuellen Abstraktion in den Bildraum werden Texturen oft weiteren Transformationen unterzogen (z.B. bei perspektivischen Verzerrungen). Zusammen mit dem mitunter komplexen Verhalten der Bildmanipulationen (z.B. bei Aquarellen), ist es unter Umständen schwierig, das endgültige Erscheinungsbild der Texturen nach der Bildmanipulation vorauszusagen. Allerdings werden Texturen gemäß [Mac86] vorrangig für die Visualisierung nominaler und ordinaler Daten eingesetzt, bei der die Unterscheidbarkeit und sogar eine spontane Ordnung der Texturen durch den Nutzer wichtig ist. Diese Charakteristika können nach durchgeführten Bildmanipulationen auf Texturen eventuell nicht mehr gewährleistet werden. Aus diesem Grund ist darauf zu achten, dass die eingesetzten Manipulationsverfahren die Unterscheidbarkeit und eventuelle Ordnung der Texturen weitestgehend erhalten. Wegen dieser Einschränkungen werden Texturen als sekundäres Anwendungsgebiet für Bildmanipulationen eingestuft.

3.1.2.4. Sekundär: Spezialfall – Visualisierung von Bildersammlungen

Zu den von der Informationsvisualisierung behandelten Daten können im Spezialfall auch Bildersammlungen gehören. Die wesentliche Motivation bei deren Visualisierung besteht im effizienten Auffinden einzelner Bilder (z.B. in [KS00, Bed01, KS06, SBD06, MFGJ08]). Dabei werden die Bilder im Allgemeinen bezüglich ihrer Eigenschaften (z.B. Farbgebung, enthaltene Formen, Metadaten) analysiert, sortiert, geeignet angeordnet und in verkleinerter Form dargestellt.



Dadurch, dass in diesem speziellen Szenario die Daten selbst Bilder sind und diese schließlich auch auf der Bilddatenebene angezeigt werden, können Bildmanipulationen auf allen Stufen des Data-State-Referenzmodells durchgeführt werden. Da die Eingabebilder dabei jeweils einzeln modifiziert werden können, ist es offensichtlich, dass die Manipulationsmöglichkeiten punktuelle, lokale und globale Modifikationen erlauben. Da Bilddaten auf allen Stufen vorliegen, können durch sie zum Teil auch weitere Bilddaten erzeugt und ebenso manipuliert werden. Im *Filtering* können etwa Schraffuren, Differenzbilder oder Ähnliches erzeugt werden, die im Zustand der analytischen Abstraktion wiederum geglättet werden können und so weiter.

Es muss jedoch angemerkt werden, dass Bildmanipulationsverfahren auf den zu visualisierenden Bilddaten grundsätzlich einen Eingriff in die Daten darstellen und die enthaltenen Informationen verändern. Somit kann die Expressivität der visuellen Repräsentation verletzt werden. Wegen dieser Einschränkung wird auch dieser Spezialfall als sekundäres Anwendungsgebiet für Bildmanipulationen eingestuft, obwohl sie auf allen Stufen des Data-State-Referenzmodells angewendet werden können.

3.1.2.5. Zusammenfassung und Bewertung

Die vorigen Abschnitte zeigen, dass Bildmanipulationsverfahren prinzipiell auf der Bilddatenebene anwendbar sind, für eine *illustrative* Anwendung jedoch zusätzliche Informationen etwa in Form entsprechender *G-Buffer* benötigen. Daneben kann das *Rendering* selbst für Bildmanipulationen genutzt werden. Es benötigt hierfür allerdings die visuelle Abstraktion anstelle der Bilddaten als Eingabe. Bildmanipulationen lassen sich weiterhin auf Texturen im Zustand der visuellen Abstraktion und im Spezialfall zu visualisierender Bildersammlungen auf allen Stufen des Data-State-Referenzmodells anwenden. Wegen der Möglichkeit punktueller, lokaler und globaler Modifikationen, ist es in jedem der Ansatzpunkte prinzipiell möglich, wichtige von weniger wichtigen Daten visuell zu trennen und zusätzliche Details über die Eigenschaften der Manipulationen einzubringen.

Dennoch sind die beschriebenen Möglichkeiten nicht in gleichem Umfang und gleicher Mächtigkeit zur illustrativen Informationsvisualisierung geeignet. Als naheliegender Ansatz stellen sich Bildmanipulationen auf der Bildebene dar. In diesem Zustand liegen immer Bilddaten vor, die Wirkung der Bildmanipulationen unterliegt keinen weiteren Transformationen, alle Bildmanipulationsverfahren die Bilddaten als Eingabe erwarten lassen sich als Operator auf diesem Zustand implementieren, und es gibt keine Einschränkungen durch die genutzte Hardware. Für die punktuelle und lokale Nutzung der Bildma-

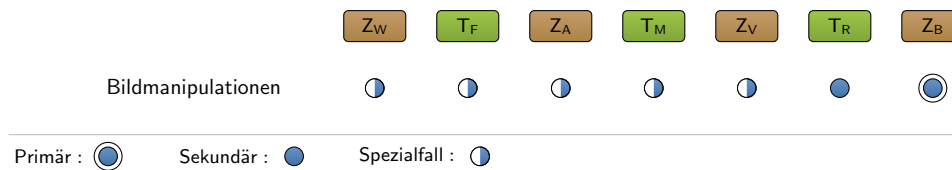


Abbildung 3.3.: Anwendungsgebiete für Bildmanipulationen im Data-State-Referenzmodell. Die Spezialfälle liegen vor, wenn Texturen für die Visualisierung genutzt werden oder wenn Bildersammlungen visualisiert werden.

nipulationsverfahren ist ein Eingriff in das *Rendering* notwendig, um etwa entsprechende *G-Buffer* bereitzustellen. Dementsprechend wird die Bilddatenebene als primäres Anwendungsgebiet dieser Verfahren angesehen.

Demgegenüber weisen die anderen Anwendungsbereiche Einschränkungen auf: Bildmanipulationen lassen sich nur dann auf Texturen anwenden, wenn diese im *Mapping* für die Visualisierung genutzt werden. Im *Rendering* lassen sich nicht alle Manipulationsverfahren wegen Hardwarebeschränkungen umsetzen und der Spezialfall zu visualisierender Bildersammlungen beschreibt eher eine Ausnahme der Informationsvisualisierung. Da aber trotzdem viele Bildmanipulationen bei den genannten Optionen möglich sind, werden sie als sekundäre Anwendungsbereiche für Bildmanipulationen angesehen.

Insgesamt muss angemerkt werden, dass sich durch Bildmanipulationsverfahren aber auch Probleme ergeben können, insbesondere wegen der vielfältigen Parametrisierungsmöglichkeiten und der inhärenten Zufälligkeit der Verfahren. Speziell das schwierige Abschätzen der Verfahrensergebnisse kann die visuelle Kommunikation von Informationen negativ beeinflussen. Gerade wenn die Wirkung verwendeter NPR-Parameter dem Nutzer unbekannt ist (z.B. *Pigmentgewicht* in der Aquarellsimulation) kann dieser Fall eintreten. Ebenso problematisch ist es, wenn datenkodierende visuelle Variablen (z.B. *Farbe*) manipuliert werden. Dementsprechend müssen die zu verwendenden Bildmanipulationsverfahren sorgfältig gewählt und parametrisiert werden.

Abbildung 3.3 verdeutlicht noch einmal die vorgestellten prinzipiellen Anwendungsmöglichkeiten für Bildmanipulationsverfahren in der illustrativen Informationsvisualisierung. In Kapitel 4 werden hierfür konkrete Beispiele vorgestellt.

3.1.3. Zusätzliche Grafikprimitive

	Z _W	T _F	Z _A	T _M	Z _V	T _R	Z _B
BM	○	○	○	○	○	○	○
ZG	○	○	○	○	○	○	○
MM	○	○	○	○	○	○	○
ZT	○	○	○	○	○	○	○

Neben der vereinfachenden Darstellung und der visuellen Trennung (etwa durch verschiedene Stile) ist das Einbringen zusätzlicher Detailinformationen ein wichtiger Bestandteil des NPRs und insbesondere der Illustration. Zu diesen Zwecken wird auch auf zusätzliche Grafikprimitive zurückgegriffen. Das Einbringen zusätzlicher Details ist auch ein wichtiges Grundprinzip in der Informationsvisualisierung, das beispielsweise mit dem *Visual Information Seeking Mantra* als *Details-on-Demand* beschrieben ist [Shn96].

Im NPR werden zusätzliche Grafikprimitive als zusätzliche Datenstrukturen definiert, die weder zum geometrischen Modell noch zum zweidimensionalen Bild gehören und vielfältig parametrisiert werden können. Sie dienen im NPR primär der modell- und bildunabhängigen und damit austauschbaren Definition verschiedener Stile und unterscheiden sich gerade durch ihre Komplexität von Grafikprimitiven, die Grafikbibliotheken gewöhnlich bereitstellen. Insbesondere *Strokes* gehören zu den zusätzlichen Grafikprimitiven [Sch07]. In der Illustration spielen aber auch Beschriftungen eine wichtige Rolle, die ebenfalls als zusätzliche Grafikprimitive aufgefasst werden können. Der Inhalt der Beschriftung ist zwar fest vorgegeben, allerdings sind die Schriftgestaltung (Größe, Schriftart,...) und selbst die Beschriftungsposition meist vom Modell und vom Bild unabhängig und in gewissem Rahmen austauschbar. Die diversen Optionen zur Schriftgestaltung stellen eine Entsprechung zu den facettenreichen Attributierungsmöglichkeiten der *Strokes* dar, sind dadurch mit unterschiedlichen erzeugbaren Stilen vergleichbar und heben sich auch hinsichtlich ihrer Komplexität von herkömmlichen Grafikprimitiven ab.

Beschriftungen, aber auch zusätzliche grafische Hinweise (z.B. Pfeile), sind in der Informationsvisualisierung sinnvoll und üblich. Allerdings wird die Vielfalt der Möglichkeiten, die das NPR durch zusätzliche Grafikprimitive und entsprechender Stile bereitstellt, in der Informationsvisualisierung noch nicht in gleicher Weise aufgegriffen. Es ist naheliegend, zusätzliche Grafikprimitive neben dem geometrischen Modell im Zustand der visuellen Abstraktion zur Verfügung zu stellen. Auf diese Weise können etwa unterschiedliche Stile die visuelle Trennung von Informationen unterstützen oder Beschriftungen, Pfeile und andere Markierungen der Datailanreicherung und der Hervorhebung dienen. Gerade die weitreichenden Parametrisierungsmöglichkeiten der zusätzlichen Grafikprimitive können weitere Möglichkeiten für den *Mapping*-Schritt eröffnen, Daten auf visuelle Variablen abzubilden. Bezogen auf das Data-State-Referenzmodell sind also der Zustand der visuellen Abstraktion und die *Mapping*-Operatoren ein wesentlicher Anwendungsbe- reich für zusätzliche Grafikprimitive. Nachfolgend wird deshalb die mögliche Anwendung zusätzlicher Grafikprimitive und sich daraus ergebende Implikationen untersucht.

3.1.3.1. Primär: Im Zustand der visuellen Abstraktion

Neben einem geometrischen Modell werden im NPR oft zusätzliche Grafikprimitive als weiterer Ausgangspunkt der Bilderzeugung herangezogen. Sie werden unter anderem dazu genutzt, um verschiedene Stile zu definieren die den Modellbestandteilen zugewiesen werden oder um gezielt zusätzliche Details einzubringen – jeweils um Informationen hervorzuheben. Hiervon ausgehend liegt es nahe, auf der Stufe der visuellen Abstraktion neben dem im *Mapping* erzeugten geometrischen Modell auch zusätzliche Grafikprimitive einzubinden. Die Nutzung unterschiedlicher Stile aber auch das Einbringen von Beschriftungen, Pfeilen u.Ä. kann in der illustrativen Informationsvisualisierung Vorteile bringen und beispielsweise die Lokalisation einzelner visueller Repräsentanten unterstützen.

Z _W	T _F	Z _A	T _M	Z _V	T _R	Z _B	
○	○	○	○	○	○	○	BM
○	○	○	●	○	○	○	ZG
○	○	○	○	○	○	○	MM
○	○	○	○	○	○	○	ZT

Das Tutorial zum *Stroke-based Rendering* [Her03] zeigt, dass sich verschiedene Stile im Wesentlichen durch die Ausgestaltung der zusätzlichen Grafikprimitive und deren Platzierung unterscheiden. Für eine visuelle Trennung wichtiger und weniger wichtiger Informationen und für die Detailanreicherung sind den Modellbestandteilen also unterschiedliche zusätzliche Grafikprimitive und geeignete Platzierungsverfahren zuzuweisen. Diese Zuordnung kann prinzipiell beliebig erfolgen und ist punktuell, lokal und global möglich. Sie legt fest, welcher visuelle Repräsentant unter Zuhilfenahme welches zusätzlichen Grafikprimitives und entsprechender Platzierungsverfahren dargestellt werden soll. Die Integration der zusätzlichen Grafikprimitive in das geometrische Modell oder den Bildraum – also die Platzierung und Anpassung von Pinselstrichen, Beschriftungen, Pfeilen u.Ä. – erfolgt wie im NPR unter Zuhilfenahme zusätzlicher Transformationen.

Viele der durch die NPR-Verfahren und die zusätzlichen Grafikprimitive erzeugten Stile führen zu einer gewissen Reduktion der dargestellten Informationen – etwa einer gröberen Darstellung durch Pinselstriche, Mosaiksteine o.Ä. oder einem Farbverlust bei Schraffuren oder Punktzeichnungen. Um die Kommunikation relevanter Informationen zu unterstützen, sind derartige Verfahren bevorzugt für die weniger wichtigen Informationen bzw. visuellen Repräsentanten zu nutzen. Im Gegensatz dazu können entsprechend gestaltete *Strokes* als Konturen aber auch geeignete Beschriftungen, Pfeile oder Markierungen die wichtigen Informationen hervorheben. Dabei ist grundsätzlich darauf zu achten, dass die Expressivität und die Effektivität der visuellen Repräsentation nicht verletzt wird. Wird etwa die visuelle Variable *Position* zur Kodierung von Daten genutzt, sollte auf vergrößernde Darstellungen beispielsweise mit Pinselstrichen verzichtet werden.

Die zusätzlichen Grafikprimitive liegen neben dem geometrischen Modell im Zustand der visuellen Abstraktion vor und können etwa festlegen, in welchem Stil visuelle Repräsentanten darzustellen sind. Darüber hinaus, sind zusätzliche Grafikprimitive besonders durch ihre hohe und flexible Parametrisierbarkeit gekennzeichnet, die sich im *Mapping* für die Visualisierung von Daten nutzen lässt.

3.1.3.2. Primär: Mapping

$Z_W \ T_F \ Z_A \ T_M \ Z_V \ T_R \ Z_B$
 BM ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
 ZG ○ ○ ○ ● ○ ○ ○
 MM ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
 ZT ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

Im *Mapping*-Schritt werden Daten auf visuelle Variablen abgebildet. Will man mit zusätzlichen Grafikprimitiven bisher nicht dargestellte weitere Daten visualisieren, so ist es naheliegend, dies im *Mapping*-Schritt mit der Kodierung der Daten zu verbinden. Daraus ergeben sich wesentliche Vorteile. Wenn man beispielsweise *Strokes* nutzt, so stehen die Parameter zur Beschreibung der *Strokes* sowohl zur Kodierung von Daten als auch zur Kodierung weiterer Eigenschaften wie beispielsweise Unsicherheiten zur Verfügung.

Die Anwendbarkeit zusätzlicher Grafikprimitive unterliegt keinen speziellen Anforderungen sondern stellt vielmehr eine optionale Erweiterung der Möglichkeiten in den *Mapping*-Operatoren dar. Wie im vorigen Abschnitt bereits beschrieben, wird die visuelle Abstraktion nunmehr nicht nur über das geometrische Modell zur Beschreibung der Daten, sondern auch über zusätzliche Grafikprimitive definiert. Auf diese Weise sind die zusätzlichen Grafikprimitive mit punktuell, lokalen und globalen Wirkungsbereich nutzbar.

Zu beachten ist allerdings, dass Wechselwirkungen zwischen den visuellen Variablen zur Kodierung der Daten und den Parametern der zusätzlichen Grafikprimitive bestehen. So beeinflussen etwa die Parameter Breite und Druck eines Pinsel-*Strokes* jeweils die visuelle Variable *Fläche*. Wenn aber mit der Variable *Fläche* Datenwerte kodiert werden, kann dies zu falschen Interpretationen führen. Deshalb ist eine sorgfältige Parametrisierung der zusätzlichen Grafikprimitive notwendig.

Hinzu kommt, dass nicht immer alle Eigenschaften der zusätzlichen Grafikprimitive im *Mapping* festgelegt werden. Eigenschaften wie etwa die Position oder Größe werden oft erst unter Zuhilfenahme von zusätzlichen Transformationen festgelegt. Das heißt, im *Mapping* wird beispielsweise definiert, wie die Daten kodiert und welche zusätzlichen Grafikprimitive welche Informationen kommunizieren sollen. Die Positionen und Größen der zusätzlichen Grafikprimitive werden jedoch oft erst in einem gesonderten Schritt bestimmt. Diesem zweiten Schritt ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen, um beispielsweise Verdeckungen beim *Rendering* zu vermeiden. Da hierbei etwa die Größen der zusätzlichen Grafikprimitive angepasst werden können (z.B. von Beschriftungen), genügt es, einige Eigenschaften der Grafikprimitive im *Mapping* nur relativ anzugeben (z.B. Großstädte: Schriftgrad größer als normal, Dörfer: Schriftgrad kleiner als normal).

3.1.3.3. Zusammenfassung und Bewertung

Die vorigen Abschnitte zeigen, dass es sowohl auf der Ebene der visuellen Abstraktion als auch im *Mapping*-Schritt prinzipiell möglich und sinnvoll ist, zusätzliche Grafikprimitive in das Data-State-Referenzmodell einzubinden. Danach sind die zusätzlichen Grafikprimitive neben dem geometrischen Modell als Teil der visuellen Abstraktion anzusehen. Für die Positionierung, Skalierung, Ausrichtung etc. der zusätzlichen Grafikprimitive werden wie im NPR zusätzliche Transformationen benötigt.

Die Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive (z.B. Beschriftungen, Pfeile) und durch sie definierbare Stile können die visuelle Trennung relevanter und weniger relevanter Informationen unterstützen. Durch die Einbindung in den *Mapping*-Schritt lässt sich zudem die Abbildung von Daten auf visuelle Variablen erweitern. Somit können auch bei großer Dimensionalität der Datensätze noch zusätzliche Details in die Visualisierung eingebracht werden, um zum Beispiel das *Information Seeking Mantra* umzusetzen. Beschriftungen können zudem über ihren Inhalt zusätzliche Informationen kommunizieren und die Interpretation der Daten fördern.

Die zusätzlichen Grafikprimitive müssen wie im NPR in einem gesonderten Schritt in das geometrische Modell beziehungsweise den Bildraum integriert werden (siehe Abb. 2.4 auf S.15). Hieraus resultiert eine enge Kopplung zwischen den zusätzlichen Grafikprimitive und den hierbei verwendeten zusätzlichen Transformationen: Die Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive zur Visualisierung von Daten ist nur dann sinnvoll, wenn sichergestellt werden kann, dass dies nicht zur Verdeckung relevanter Informationen führt. Wie bei ikonobasierten Visualisierungstechniken (z.B. [Fuc02]), kann etwa die gegenseitige Überlagerung weniger Primitive, die Effektivität und sogar die Expressivität der gesamten Visualisierung beeinflussen.

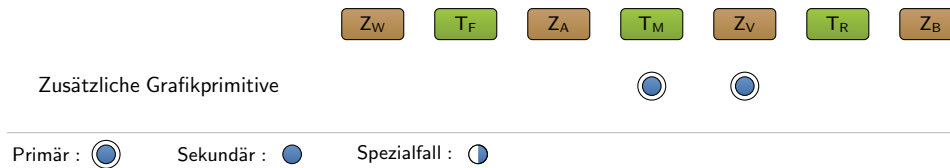


Abbildung 3.4.: Nutzbarkeit zusätzlicher Grafikprimitive im Data-State-Referenzmodell. Die zusätzlichen Grafikprimitive lassen im Zustand der visuellen Abstraktion etwa zur Definition unterschiedlicher Stile und in den *Mapping*-Operatoren für die Kodierung von Daten nutzen. Sie sind Bestandteil der visuellen Abstraktion.

Abbildung 3.4 zeigt die Stufen, die das Einbinden der zusätzlichen Grafikprimitive im Data-State-Referenzmodell erlauben. Da die visuelle Trennung wichtiger und weniger wichtiger Informationen und die Kommunikation zusätzlicher Details von hoher Bedeutung für die illustrative Informationsvisualisierung sind, werden beide Stufen als primäre Anwendungsoptionen eingeordnet. Konkrete Verfahren zur Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive werden in Kapitel 5 vorgestellt.

3.1.4. Modellmanipulationen

	Z _W	T _F	Z _A	T _M	Z _V	T _R	Z _B
BM	○	○	○	○	○	○	○
ZG	○	○	○	○	○	○	○
MM	○	○	○	○	○	○	○
ZT	○	○	○	○	○	○	○

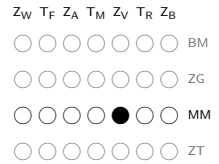
Wie Bildmanipulationen, werden Modellmanipulationen im NPR unter anderem genutzt, um wichtige von unwichtigen Informationen zu trennen und zusätzliche Details in die Darstellung einzubringen. Beispielhaft seien unterschiedliche Skalierungen oder die Verfeinerung/Vergrößerung geometrischer Modelle genannt. Diese Verfahren stellen damit eine Möglichkeit zur Umsetzung illustrativer Ziele in der Informationsvisualisierung dar.

Die Modellmanipulationen des NPR setzen die Existenz eines geometrischen Modells voraus (vgl. Kap. 2.2.1). Allerdings ist ein solches Modell in der Informationsvisualisierung nicht von vornherein gegeben, sondern muss erst mit Hilfe der *Mapping*-Operatoren erzeugt werden. Es liegt dann im Zustand der visuellen Abstraktion vor. Da in diesem Zustand alle Voraussetzungen für die Anwendung von Modellmanipulationen gegeben sind, ist eine Einordnung als primäres Anwendungsgebiet naheliegend.

Andererseits ist es aber auch möglich, bereits vorher durch entsprechende Veränderungen auf die Modellerzeugung Einfluss zu nehmen. Die beabsichtigten Modifikationen der geometrischen Modellbeschreibung werden dementsprechend schon vor oder während der Modellerzeugung berücksichtigt, und so wird ein bereits modifiziertes geometrisches Modell erzeugt. Diese zusätzliche Option besteht nicht im NPR, da geometrische Modelle hier als Ausgangspunkt der Bilderzeugung angesehen werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden deshalb auch mögliche Ansätze zu Modellmanipulationen auf vorhergehenden Stufen des Data-State-Referenzmodells betrachtet. Derartige Manipulationen bei der Modellerzeugung werden als sekundärer Ansatzpunkt eingestuft.

3.1.4.1. Primär: Manipulation des geometrischen Modells

Die Voraussetzung für Modellmanipulationen – ein vorliegendes geometrisches Modell – legt das primäre Anwendungsgebiet dieser Verfahren im Zustand der visuellen Abstraktion nahe. Das in diesem Zustand vorliegende geometrische Modell wurde zuvor mit *Mapping*-Operatoren erzeugt.



Wegen der Vielfalt möglicher geometrischer Modelle lassen sich auch vielfältige Manipulationsmöglichkeiten auf Modellebene ableiten. Im Gegensatz zum NPR müssen die verschiedenen Optionen jedoch jeweils gesondert untersucht werden. Im NPR wird in der Regel von dreidimensionalen Modellen realer Objekte ausgegangen. Aus diesem Grund erwarten existierende Modellmanipulationsverfahren meist auch eine ähnliche Ausgangssituation; beispielsweise dass gewisse Eigenschaften der dreidimensionalen Modelle ähnlich manipuliert werden können (Positionsänderungen, Auftrennen in Bestandteile, Austausch von Materialien. . .). Im Unterschied dazu werden in der Informationsvisualisierung oft auch zweidimensionale Modelle erzeugt, die sich gemäß der freien Wahl der *Mapping*-Operatoren zudem stark unterscheiden können. Viele der NPR-Verfahren für dreidimensionale Modelle lassen sich zwar auf den zweidimensionalen Fall übertragen (z.B. Verzerrungen), jedoch werden die unterschiedlichen Ausgangssituationen die Anwendbarkeit der Verfahren häufig einschränken oder visualisierungsspezifische Anpassungen erfordern. Dies gilt es zu beachten. Als Beispiel für den Aufwand visualisierungsspezifischer Anpassungen in der Informationsvisualisierung seien die verschiedenen Arbeiten zum *Edge-Bundling* genannt (z.B. [PXY⁺05, Hol06, GK07, CZQ⁺08, ZYQ⁺08, HW09]), die jeweils die grundlegende Idee der *Flow Maps* [Bri39] aufgreifen und für verschiedene Daten und Visualisierungsverfahren (hierarchische Graphen, allgemeine Graphen, runde Graphlayouts, parallele Koordinaten. . .) anpassen.

Trotzdem sind Modellmanipulationen auf der Modellebene prinzipiell nutzbar. Weil auf dieser Stufe des Data-State-Referenzmodells sämtliche Informationen über die visuellen Repräsentanten vorliegen, sind punktuelle, lokale, und globale Modellmanipulationen realisierbar. So ist also auch eine differenzierte Modifikation des Modells für eine illustrative Informationsvisualisierung möglich. Dabei können im Prinzip sämtliche Bestandteile des geometrischen Modells manipuliert werden und folglich sind manipulierte Größen (z.B. Punkte in *Scatterplots*), Linienbreiten (z.B. in Graphvisualisierungen), Farben, Positionen und Ähnliches denkbar. Als komplexeres Beispiel können die Kapitel 2.3.5 bereits genannten Verzerrungstechniken aufgeführt werden (z.B. [CCF97]). Derartige Modellmanipulationen werden in dieser oder abgewandelter Form bereits in der Informationsvisualisierung genutzt (z.B. [TFS08a]).

Bei der Anwendung der Modellmanipulationen ist darauf zu achten, dass weder die Effektivität noch die Expressivität verletzt werden. Deshalb sollten lediglich Bestandteile des geometrischen Modells manipuliert werden, deren Veränderung die Kodierung von Datenwerten nicht verändert. Wird etwa die visuelle Variable *Größe* für die Visualisierung von Datenwerten genutzt, so ist eine Hervorhebung relevanter Daten durch skalierende Verzerrungen nicht erlaubt.

3.1.4.2. Sekundär: Modellmanipulation durch Datenanreicherung

Z_W T_F Z_A T_M Z_V T_R Z_B
 BM ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
 ZG ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
 MM ○ ● ● ○ ○ ○ ○
 ZT ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

Mit den *Filtering*-Operatoren und den Zustandsoperatoren der analytischen Abstraktion lassen sich die zu visualisierenden Daten analysieren und mit Metadaten anreichern. Diese ermöglichen wiederum eine Modifikation geometrischer Modelle: Für unterschiedliche Visualisierungstechniken können jeweils spezifische Metadaten erzeugt werden, die im späteren *Mapping* zu Veränderungen der Modellerzeugung führen und damit auch die Erzeugung der visuellen Repräsentation beeinflussen. Beispielsweise lassen sich Metadaten nutzen, um im *Mapping* genutzte Farbskalen festzulegen. Werden diese Metadaten geändert, lassen sich auf diese Weise auch entsprechende Modifikationen in der Farbkodierung hervorrufen. Die gleichen Metadaten können auch für Skalenanpassungen zum Beispiel in *Scatterplots* verwendet werden, was dort etwa zu einer Verschiebung von Punktpositionen führen kann. Prinzipiell lässt sich in beiden Fällen die Darstellung durch das Einbinden von Wertebereichseigenschaften beeinflussen und es kann sowohl die visuelle Trennung (z.B. durch Farben) als auch die Detailanreicherung (z.B. feinere Skalenunterteilung) unterstützt werden.

Auch hier ist darauf zu achten, dass trotz derartiger Modifikationen des geometrischen Modells die Expressivität erhalten bleibt – etwa das trotz einer Farbskalenmodifikation die Charakteristika der zugrunde liegenden Daten berücksichtigt werden, da beispielsweise nominale Daten andere Farbskalen als ordinale Daten erfordern. Schließlich muss noch erwähnt werden, dass bei solchen Modifikationen bekannt sein sollte, wie die Metadaten im *Mapping* berücksichtigt werden und welchen Effekt entsprechende Änderungen haben. Wenn die Wirkung der Metadaten bekannt ist, lassen sich prinzipiell auch punktuelle, lokale und globale Modellmanipulationen und somit auch illustrative Ziele umsetzen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich auf der Basis von Metadaten die visuellen Repräsentanten gezielt manipulieren lassen. Allerdings werden die Metadaten im Datenraum festgelegt, aber erst mit der Überführung in grafische Daten ausgewertet. Dazu müssen die Folgen abgeschätzt werden, was nicht immer einfach ist. Wegen dieser Einschränkung wird diese Option als sekundär eingestuft.

3.1.4.3. Sekundär: Modellmanipulation während der Modellerzeugung

Z_W T_F Z_A T_M Z_V T_R Z_B
 BM ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
 ZG ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
 MM ○ ○ ○ ● ○ ○ ○
 ZT ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

Es ist offensichtlich, dass ein geometrisches Modell bereits bei dessen Erzeugung durch entsprechende *Mapping*-Operatoren verändert werden kann. So können die visuellen Repräsentanten einzelner Daten bereits modifiziert angelegt werden – zum Beispiel kann statt einer hervorhebenden Verzerrung des geometrischen Modells (siehe oben) auch eine verzerrende Abbildung auf die visuelle Variable *Größe* durchgeführt werden. Da das Modell erst erzeugt wird, lassen sich sowohl punktuelle, lokale als auch globale Veränderungen der visuellen Repräsentanten herbeiführen.

Obwohl die freie Wahl der *Mapping*-Operatoren im Data-State-Referenzmodell die Erzeugung modifizierter Modelle und somit Modellmanipulationen zulässt, führt die Option, das *Mapping* beliebig manipulieren zu können, auch zu Problemen. Insbesondere kann die Expressivität der Visualisierung verletzt werden, wenn etwa datenrepräsentierende Grö-

ßen, Positionen oder Farben einzelner visueller Repräsentanten verändert werden, um deren Hervorhebung zu erzielen. Eine Modifikation der Modellerzeugung darf sich aus diesem Grund nur auf diejenigen visuellen Variablen beziehen, die keine Daten kodieren. Diese Variablen können dann jedoch für die visuelle Trennung wichtiger und weniger wichtiger Informationen und auch für die Detailanreicherung genutzt werden. Des Weiteren sollten die Modifikationen nicht zu sehr die ursprünglich beabsichtigte Visualisierung verändern: In der Regel erwartet der Nutzer beispielsweise hinter einem *illustrativen Scatterplot* eine Visualisierung, die einem üblichen *Scatterplot* ähnelt. Wird diese Erwartung und damit das mentale Modell des Nutzers durch zu umfangreiche Modifikationen zerstört, so kann hierdurch die Effektivität der Darstellung sinken.

Neben der Manipulation visueller Variablen ist es auch denkbar, das geometrische Modell bei seiner Erzeugung zu attributieren. Ein plausibles Beispiel ist etwa die Anreicherung des geometrischen Modells mit Prioritäten wie es etwa ČMOLIK vorschlägt [Čmo11]. Visuelle Repräsentanten können so aufgrund ihrer Priorität im *Rendering* gesondert behandelt werden, um hierdurch etwa eine besondere *Rendering*-Reihenfolge sicherzustellen, die die Überlagerung relevanter Informationen verhindert. Genauso ließen sich Beschriftungen priorisieren, um zu garantieren, dass diese bevorzugt platziert werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Manipulation des späteren geometrischen Modells bereits bei dessen Erzeugung möglich ist. Obwohl die *Mapping*-Operatoren weitreichende Optionen bieten, führen die Forderungen nach Expressivität und Effektivität jedoch zu Einschränkungen. So muss das mentale Modell des Nutzers erhalten bleiben und es dürfen keine datenkodierenden visuellen Variablen für die Modifikationen genutzt werden. Deshalb wird dieses Vorgehen als sekundäres Anwendungsgebiet eingestuft.

3.1.4.4. Zusammenfassung und Bewertung

Modellmanipulationen können auf verschiedenen Stufen des Data-State-Referenzmodells herbeigeführt werden. Ein geometrisches Modell ist allerdings erst im Zustand der visuellen Abstraktion gegeben, was diesen Zustand als primäre Option für Modellmanipulationen festlegt. Aufgrund der Diversität der Visualisierungstechniken erfordert diese Option in der Regel technikspezifische Anpassungen. Gleichzeitig bieten die genannten Modellmanipulationen die größte Kontrolle über Modifikationen, da sich nachfolgende Stufen des Data-State-Referenzmodells nur noch mit der Darstellung des Modells befassen.

Darüber hinaus ist es im Data-State-Referenzmodell möglich, bereits auf die Erzeugung des geometrischen Modells Einfluss zu nehmen. Für dieses Vorgehen existiert keine Entsprechung im NPR, da geometrische Modelle hier in der Regel als gegeben angesehen und nicht erst erzeugt werden. Die Modellerzeugung kann auf verschiedenen Stufen des Data-State-Referenzmodells modifiziert werden, um hierdurch die Kommunikation relevanter Informationen zu unterstützen. Dazu zählt etwa die Modellmanipulation mittels der Metadaten die sich mit den Operatoren T_F und Z_A erzeugen lassen. Dabei ist zu beachten, dass die Metadaten meist von verschiedenen Visualisierungstechniken ausgewertet werden und Modifikationen sich entsprechend unterschiedlich auswirken können. Deshalb setzen diese Manipulationen Kenntnisse über die später verwendeten *Mapping*-

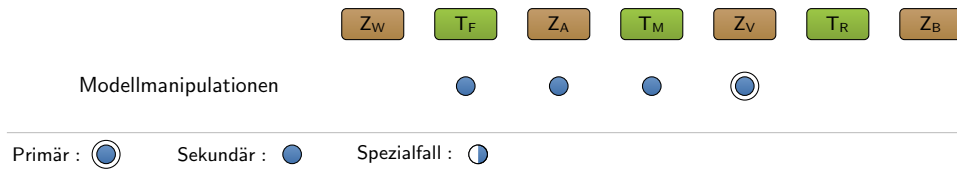


Abbildung 3.5.: Anwendungsmöglichkeiten für Modellmanipulationen im Data-State-Referenzmodell. Das primäre Anwendungsgebiet für Modellmanipulationsverfahren liegt in den Zustandsoperatoren Z_V , da hier ein geometrisches Modell existiert. Allerdings besteht in der Informationsvisualisierung auch die Möglichkeit, das Modell bei dessen Erzeugung bzw. die hierfür genutzten Daten zu modifizieren.

Operatoren voraus, um in die Modellerzeugung gezielt eingreifen zu können. Schließlich können die *Mapping*-Operatoren selbst angepasst werden. Sie bieten im Vergleich zu den vorigen Ansätzen die weitreichendsten Möglichkeiten der Manipulation. Allerdings sollte bei dieser Option beachtet werden, dass das mentale Modell des Nutzers durch Modifikationen nicht beeinträchtigt wird. Deshalb werden sämtlich Manipulationen während der Modellerzeugung als sekundäre Optionen eingestuft.

Bei sämtlichen Modellmanipulationen sollte darauf geachtet werden, dass keine datenkodierenden visuellen Variablen beeinflusst werden. Hierdurch kann die Effektivität und die Expressivität verletzt werden. Abbildung 3.5 fasst die prinzipiellen Möglichkeiten zur Modellmanipulation im Data-State-Referenzmodell zusammen. Als Vertreter dieses NPR-Bereiches werden in Kapitel 6 etwa Explosions- und Phantomzeichnungen in die Informationsvisualisierung eingeführt.

3.1.5. Zusätzliche Transformationen

	Z_W	T_F	Z_A	T_M	Z_V	T_R	Z_B
BM	○	○	○	○	○	○	○
ZG	○	○	○	○	○	○	○
MM	○	○	○	○	○	○	○
ZT	○	○	○	○	●	●	○

Transformationen stellen das Bindeglied zwischen den verschiedenen NPR-Bereichen dar und werden genutzt, um die NPR-Bereiche miteinander zu verknüpfen. Da im Vergleich zum photorealistischen *Rendering* beim NPR auch zusätzliche Grafikprimitive in die Bilderzeugung einbezogen werden, sind entsprechend zusätzliche Transformationen nötig. Sie sind ein integraler Bestandteil des NPRs (vgl. Abb. 2.4 auf S.15) und dienen unter anderem der Erzeugung und Integration der zusätzlichen Grafikprimitive aus bzw. in Modell- und Bilddaten.

Zusätzliche Grafikprimitive liegen im Zustand der visuellen Abstraktion vor (vgl. Kap. 3.1.3). Um sie in den Bilderzeugungsprozess zu integrieren, werden zusätzliche Transformationen benötigt. So kann etwa ein *Stroke* einem visuellen Repräsentanten zugeordnet werden und mit diesem auf der Stufe der visuellen Abstraktion vorliegen. Um diesen sichtbar zu machen, muss er in das geometrische Modell oder in einzelne Pixel überführt werden. Die Integration zusätzlicher Grafikprimitive findet also auf der Stufe der visuellen Abstraktion oder im *Rendering* statt. Zusätzliche Transformationen sind entsprechend auf diesen Stufen erforderlich.

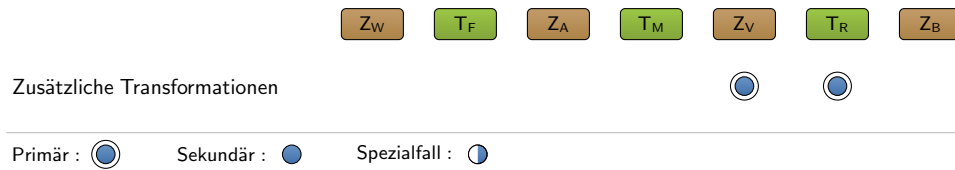


Abbildung 3.6.: Anwendungsgebiete zusätzlicher Transformationen. Sie werden insbesondere für die Integration zusätzlicher Grafikprimitive in Modell- bzw. Bilddaten benötigt.

Die im NPR vorgesehene Integration zusätzlicher Grafikprimitive in geometrische Modelldaten aber auch die Erzeugung aus vorliegenden Modelldaten lässt sich im Data-State-Referenzmodell realisieren. Für diese zusätzlichen Transformationen lassen sich ohne Weiteres die entsprechenden Operatoren Z_V im Zustand der visuellen Abstraktion nutzen. Dies gilt jedoch nicht bei Bilddaten: Die Überführung der zusätzlichen Grafikprimitive in Bilddaten mit *Rendering*-Operatoren ist zwar möglich, erfolgt aber *zusammen* mit dem geometrischen Modell. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, die durch Modelldaten erzeugten Bilddaten beispielsweise bei der Platzierung der zusätzlichen Grafikprimitive zu berücksichtigen. Dies kann etwa zu Überlagerungen durch ungünstig platzierte zusätzliche Grafikprimitive führen. Außerdem sieht das Data-State-Referenzmodell keine Wiederverwendung erzeugter Bilddaten auf anderen Stufen des Modells vor. So ist es nicht möglich, zusätzliche Grafikprimitive über Bilddaten zu definieren, die erst im Visualisierungsprozess erzeugt werden.

Unabhängig von den Einschränkungen, sind die zusätzlichen Transformationen sowohl im Zustand der visuellen Abstraktion als auch im *Rendering* grundsätzlich wichtig und so werden keine sekundären Anwendungsbereiche festgelegt (Abb. 3.6).

3.1.6. Zusammenfassung

Die Kapitel 3.1.2 – 3.1.5 haben dargelegt, dass jeder der vier NPR-Bereiche auf mindestens einer Stufe des Data-State-Referenzmodells genutzt werden kann. Es wurde außerdem gezeigt, dass die Bereiche prinzipiell auch für illustrative Zwecke einsetzbar sind. So kann auf konzeptueller Ebene sowohl die in der illustrativen Visualisierung übliche visuelle Trennbarkeit wichtiger und weniger wichtiger Daten als auch die Anreicherung mit zusätzlichen Detailinformationen umgesetzt werden.

Die Expressivitätserhaltung ist ein wichtiger Punkt bei der Nutzung der verschiedenen NPR-Bereiche im Data-State-Referenzmodell. Da alle Veränderungen potentiell die Effektivität und Expressivität der visuellen Repräsentation verletzen können, sind illustrative Verfahren entsprechend sorgsam zu wählen, zu parametrisieren und anzuwenden.

Abbildung 3.7 fasst die untersuchten Anwendungsmöglichkeiten zusammen. Sie zeigt, dass die primären Anwendungsgebiete vornehmlich im hinteren Teil des Data-State-Referenzmodells zu finden sind. Dies ist dadurch bedingt, dass die Modellerzeugung – die vor der visuellen Abstraktion angegliedert ist – im NPR nicht gesondert betrachtet wird.

	Z _W	T _F	Z _A	T _M	Z _V	T _R	Z _B
Bildmanipulationen	●	●	●	●	●	●	●
Zusätzliche Grafikprimitive				●	●		
Modellmanipulationen		●	●	●	●		
Zusätzliche Transformationen					●	●	

Primär : ● Sekundär : ● Spezialfall : ●

Abbildung 3.7.: Prinzipielle Anwendungsmöglichkeiten für NPR-Verfahren in einer illustrativen Informationsvisualisierung.

Es gilt aber auch, dass nicht alle NPR-Verfahren in Verfahren der Informationsvisualisierung genutzt werden können. Dies ist insbesondere dem unidirektionalen Aufbau des Data-State-Referenzmodells geschuldet. Das NPR-Modell (siehe Abb. 2.4 auf S.15) zeigt deutlich, dass es keine Einschränkungen bezüglich der Traversierungsreihenfolge in diesem Modell gibt. Erst durch diese freie Kombination sind viele hybride NPR-Verfahren – insbesondere wichtige Verfahren zur *Stroke*-Platzierung – realisierbar. Im Data-State-Referenzmodell ist die Traversierungsreihenfolge hingegen festgelegt, und so ist etwa die Nutzung bereits erzeugter Bilddaten auf anderen Stufen des Data-State-Referenzmodells nicht vorgesehen. Deshalb wird im nachfolgenden Abschnitt gezeigt, wie durch eine Erweiterung des Data-State-Referenzmodells schließlich sämtliche Möglichkeiten des NPRs umsetzbar werden.

3.2. Das erweiterte Data-State-Referenzmodell

Um beliebige NPR-Verfahren in das Data-State-Referenzmodell einzuordnen und der illustrativen Informationsvisualisierung zur Verfügung zu stellen, bedarf es einer Erweiterung des Data-State-Referenzmodells. Hiermit soll unter anderem erreicht werden, dass erzeugte Bilder der Bilddatenebene auch auf anderen Stufen des Data-State-Referenzmodells als Eingabe genutzt werden können.

In Abbildung 3.8 wird dieses Vorgehen veranschaulicht. Abbildung 3.8(a) zeigt das ursprüngliche NPR-Modell, das in Abbildung 3.8(b) in leicht modifizierter Form dargestellt wird (angepasstes Layout). Das Data-State-Referenzmodell wird in Abbildung 3.8(c) präsentiert. Beide Modelle lassen sich gemäß der Betrachtungen in den Kapiteln 3.1.1 – 3.1.5 zusammenfassen (Abb. 3.8(d)). Hierbei bleibt das Data-State-Referenzmodell in seiner Flexibilität und Mächtigkeit erhalten und es werden lediglich die im Kapitel 3.1 diskutierten Optionen eingebettet. Vergleicht man die Abbildungen 3.8(b) und (d), so wird offensichtlich, dass nur drei zusätzliche Transformationen fehlen (gestrichelte Linien in 3.8(d)), um das NPR-Modell vollständig in das Data-State-Referenzmodell zu integrieren: Die separate Transformation zusätzlicher Grafikprimitive in die Bildebene, die Transformation von Bilddaten zur Definition zusätzlicher Grafikprimitive und die Transformation von Bilddaten in das geometrische Modell. Diese Transformationen werden dem Data-State-Referenzmodell hinzugefügt, um auch bisher nicht nutzbare NPR-Verfahren für die illustrative Informationsvisualisierung zur Verfügung zu stellen. In den folgenden Abschnitten werden diese Erweiterungen des Data-State-Referenzmodells diskutiert.

3.2.1. Transformation: Zusätzliche Grafikprimitive \Rightarrow Bild

Mit dieser Erweiterung des Data-State-Referenzmodells wird erreicht, dass die zusätzlichen Grafikprimitive mit einer separaten Transformation in die Bildebene überführt werden können. D.h., dass das geometrische Modell und die zusätzlichen Grafikprimitive jeweils getrennt den *Rendering*-Operatoren zugeführt werden. Hierdurch wird es zum Beispiel möglich, zunächst die visuellen Repräsentanten in die Bilddatenebene zu überführen und so die bereits erzeugten Bilddaten bei der Transformation der zusätzlichen Grafikprimitive zu nutzen. Das Resultat der Transformation des geometrischen Modells wird auf diese Weise zu einem Zwischenergebnis, das jene Informationen bereithält, die für eine geeignete Transformation der zusätzlichen Grafikprimitive unter Umständen notwendig sind.

Hierdurch lassen sich etwa *Stroke*-Platzierungsverfahren des NPRs nutzen, die ein Bild als Eingabe erwarten. Als mögliches Beispiel der so nutzbaren Verfahren sei der *Difference Image Algorithm* [SWHS97] angeführt. Diese Transformation wird in Kapitel 5 auch verwendet, um erzeugte Bilddaten bei der Schriftplatzierung zu berücksichtigen.

3. Zusammenführung des NPRs und der Informationsvisualisierung

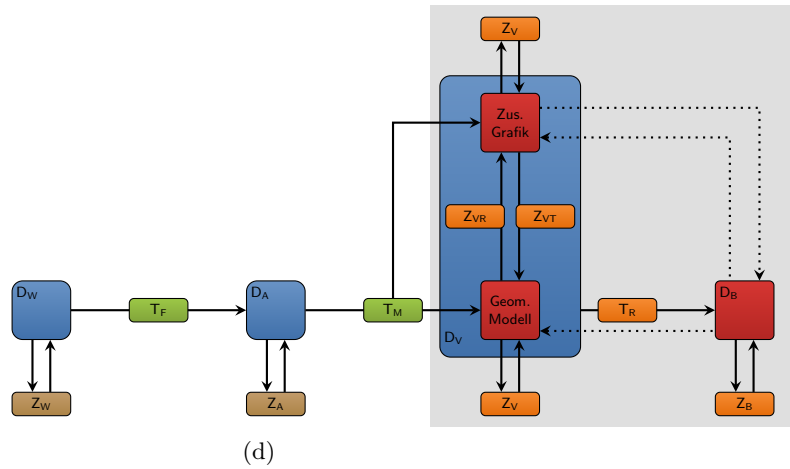
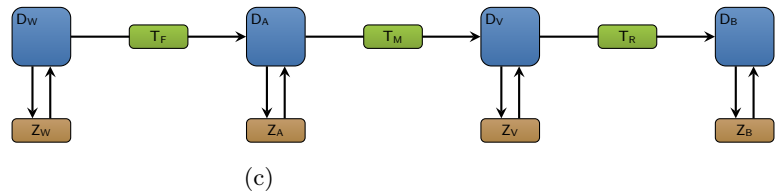
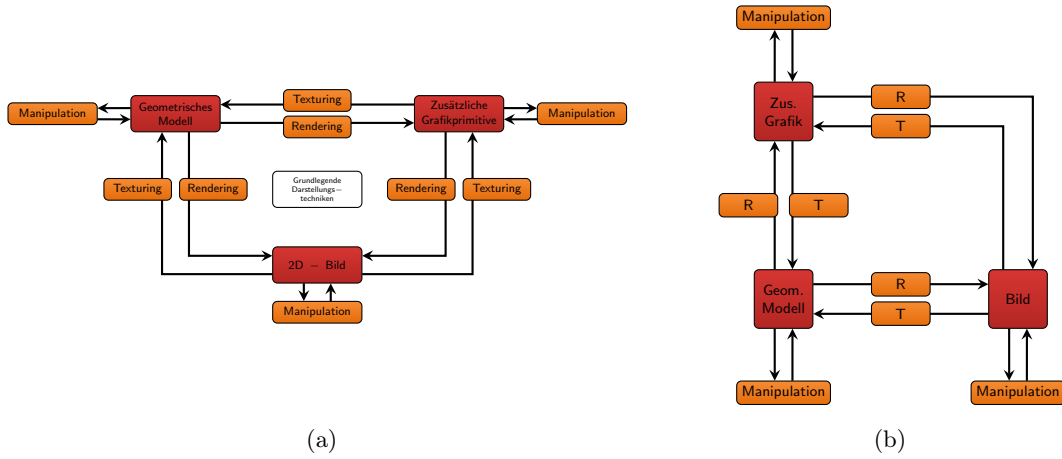


Abbildung 3.8.: Zusammenführung des NPR-Modells und des Data-State-Referenzmodells. Die Abbildung zeigt das NPR-Modell (a) und eine im Layout angepasste Version (b). Dieses Modell wird mit dem Data-State-Referenzmodell (c) kombiniert und in (d) dargestellt. Gestrichelte Linien stehen für Transformationen die im Data-State-Referenzmodell nicht vorgesehen sind. Die Abkürzungen Z_{VT} und Z_{VR} stehen für Operatoren im Zustand der visuellen Abstraktion, die dem *Texturing* und *Rendering* im Sinne des NPR-Modells dienen.

3.2.2. Transformation: Bild \Rightarrow Zusätzliche Grafikprimitive

Anders als die zuvor beschriebene Transformation, überführt diese Transformation Bilddaten aus der Bilddatenebene wieder zurück in den Zustand der visuellen Abstraktion, um damit zusätzliche Grafikprimitive zu definieren. Die zusätzlichen Grafikprimitive werden also nicht im *Mapping*-Schritt oder auf der Stufe der visuellen Abstraktion in das Data-State-Referenzmodell eingespeist, sondern aus Bilddaten gewonnen. Auf diese Weise lassen sich vor allem vielfältige Optionen zur *Stroke*-Erzeugung nutzen. So ist es beispielsweise denkbar, auf herkömmliche Art und Weise Liniendiagramme zu erzeugen und diese Bilddaten als *Flesh* eines *Skeletal Strokes* [HLW93] zu nutzen. Diese könnten etwa die Verbindungsqualität von Kanten in Graphen visualisieren. Dieses Beispiel wird in Kapitel 5.4 noch einmal kurz aufgegriffen.

Da *Strokes* prinzipiell unabhängig von der Bildebene sind, können sie sich etwa mit der Zeit verändern oder gegen andere Visualisierungen ausgetauscht werden. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass durch diese zusätzliche Transformation die Nutzungsmöglichkeiten der NPR-Verfahren zunehmen und die Möglichkeiten zur Definition zusätzlicher Grafikprimitive erweitert werden.

3.2.3. Transformation: Bild \Rightarrow Geometrisches Modell

Diese Transformation führt noch einen Schritt weiter. Aus den Bilddaten werden jetzt nicht nur zusätzliche Grafikprimitive gewonnen, sondern Texturen, die direkt in das geometrische Modell eingebunden werden können. Diese Transformation wird in Abbildung 2.4 auf S.15 als *Texturing* bezeichnet.

Bisher wird im Data-State-Referenzmodell davon ausgegangen, dass die dargestellten Texturen im *Mapping*-Schritt durch die Abbildung von Daten auf die visuelle Variable *Textur* definiert werden. Mit der eingeführten zusätzlichen Transformation ist es nun möglich, Texturen aus den erzeugten Bilddaten zu gewinnen.

Als mögliche Anwendung können beispielsweise Ausschnitte pixel- oder ikonensbasierter Visualisierungen als Texturen verwendet werden. Eine derartige Integration kleinerer detailvermittelnder Visualisierungen in größere Visualisierungen ist mit der im *Screening* stattfindenden Integration von *Dither Screens* in Bilddaten vergleichbar (z.B. [OH95]).

Mit den zusätzlich in das Data-State-Referenzmodell eingebrachten Transformationen lässt sich das NPR-Modell nach HALPER et al. und SCHLECHTWEG in das Data-State-Referenzmodell integrieren (vgl. Abb. 3.8(b) und Abb. 3.9). Somit ist es prinzipiell möglich, alle mit diesem NPR-Modell beschreibbaren Manipulationen, Transformationen und Verfahren auch im Data-State-Referenzmodell umzusetzen.

Die zusätzlich eingebrachten Transformationen heben die Unidirektionalität im Data-State-Referenzmodell zwischen dem Zustand der visuellen Abstraktion und den Bilddaten auf. Auf diese Weise können Bilddaten während des *Renderings* zusätzlicher Grafikprimitive berücksichtigt werden und außerdem zur Erzeugung von Texturen und zusätzlichen

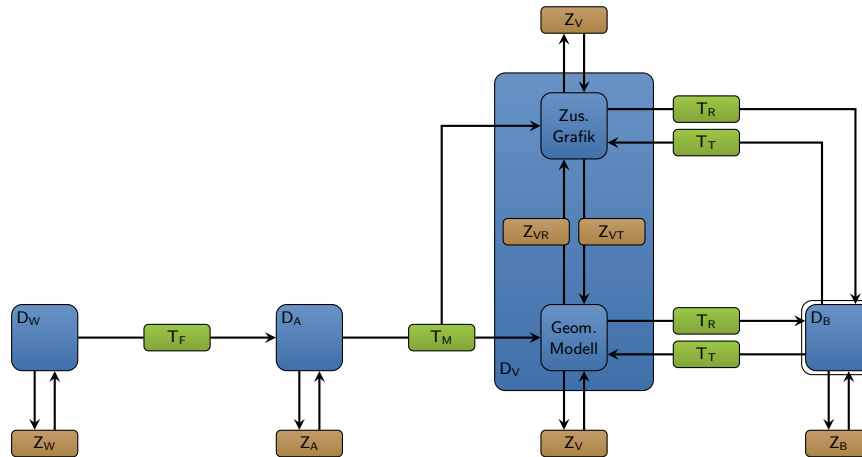


Abbildung 3.9.: Das erweiterte Data-State-Referenzmodell. Wegen der Aufhebung der Unidirektionalität wird die Bilddatenebene als finaler Zustand markiert.

Grafikprimitiven genutzt werden. Durch diesen Rücklauf entstehen neue Optionen. Hierzu werden in den folgenden Kapiteln verschiedene Beispiele vorgestellt. Es muss aber sichergestellt werden, dass der Visualisierungsprozess auf der Stufe der Bilddaten abgeschlossen wird (vgl. Abb. 3.9). In der vorliegenden Dissertation wird das neu entwickelte Data-State-Referenzmodell als *erweitertes Data-State-Referenzmodell* bezeichnet.

Die beschriebene Erweiterung des Data-State-Referenzmodells ermöglicht die Integration von NPR-Methoden in die Informationsvisualisierung. Dies unterstreicht die These von RAUTEK et al., nach der die Visualisierung eine historische Fortsetzung der wissenschaftlichen Illustration darstellt (vgl. [RBGV08]). Die ins Data-State-Referenzmodell eingebrachten Erweiterungen und Verfeinerungen ermöglichen nun lediglich die von RAUTEK et al. angesprochene explizite Nutzung etablierter handwerklicher Verfahren und ermöglichen so eine *illustrative Informationsvisualisierung*.

3.3. Zusammenfassung

Das vorliegende Kapitel hat auf Konzeptebene gezeigt, wie sich NPR-Verfahren in Verfahren der Informationsvisualisierung integrieren lassen und dass eine illustrative Informationsvisualisierung möglich ist. Hierfür wurden systematisch verschiedene Anwendungsoptionen für die NPR-Bereiche sowie deren Randbedingungen betrachtet und diskutiert. Als wesentlicher Beitrag wurde das erweiterte Data-State-Referenzmodell entwickelt, das auf Modellebene die Integration von Verfahren des NPRs in die Informationsvisualisierung ermöglicht.

Mit den durchgeführten Betrachtungen wird deutlich, dass es Stufen des Data-State-Referenzmodells gibt, für die derzeit keine NPR-Verfahren existieren. Speziell die Modellerzeugung wurde im NPR bisher nicht explizit betrachtet. Dementsprechend sind

keine etablierten NPR-Verfahren bekannt, die sich hier anwenden lassen. In Kapitel 3.1.4 wurde jedoch dargestellt, dass entsprechende Manipulationen mit der Zielsetzung einer verbesserten Kommunikation von Informationen in der Informationsvisualisierung dennoch möglich sind.

In den nachfolgenden Kapiteln wird gezeigt, dass sich auf der dargelegten konzeptuellen Basis neue Ansätze für eine illustrative Informationsvisualisierung entwickeln lassen. Diese neuen Ansätze verfolgen das Ziel, durch die Integration von NPR-Verfahren in Verfahren der Informationsvisualisierung die Kommunikation von Informationen zu unterstützen. Dabei werden alle vier NPR-Bereiche abgedeckt:

- ▷ *Bildmanipulationen* werden in **Kapitel 4** betrachtet. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf dem so genannten **Weaving** – einem Verfahren, dass an *Halftoning*-Techniken angelehnt ist und speziell als neuer Lösungsansatz für allgemeine Überlagerungen vorgestellt wird. Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführte Untersuchung verschiedener neu entwickelter *Weaving*-Ansätze und deren Anwendung in der Informationsvisualisierung wurde erfolgreich publiziert (vgl. [LRS10a]). Die Nützlichkeit der neuen Ansätze ist zudem mit einer Nutzerstudie belegt.

Darüber hinaus, werden in Kapitel 4 weitere Bildmanipulationsverfahren zusammengefasst, die im Rahmen der vorliegenden Dissertation in Verfahren der Informationsvisualisierung integriert und teilweise publiziert wurden. Dazu zählen etwa **Halos** (vgl. [LS08b]), **Schraffuren**, **Punktzeichnungen** oder das **Dithering**. Der Fokus dieser Verfahren liegt darin, einzelne relevante Daten hervorzuheben und ihre Lokalisation zu unterstützen. Ein Verfahren zur **Aquarellsimulation** (vgl. [LRS10b]) wird zudem für die Unsicherheitsvisualisierung verwendet.

- ▷ *Zusätzliche Grafikprimitive* werden in **Kapitel 5** am Beispiel von Beschriftungen betrachtet. Dazu wird zunächst ein neuer Ansatz für ein **globales Beschriftungsverfahren** eingeführt. Im Vordergrund steht hier eine schnelle Beschriftung, so dass mehr als 1500 Beschriftungen in Echtzeit und bis zu 100.000 Beschriftungen in weniger als einer Sekunde platziert werden können, ohne dabei andere wichtige Bildinformationen und Beschriftungen zu überlagern (vgl. [LSC08]).

Daneben wird auch ein neues Verfahren für die **lokale Beschriftung** eingeführt, dass eine ebenfalls überlagerungsfreie Beschriftung im Umfeld einer selektierenden Linse ermöglicht (vgl. [FLH⁺06]). Ein neu entwickelter Ansatz, der **dynamische Beschriftungen** unter Einhaltung der *Frame-to-Frame*-Kohärenz erlaubt (vgl. [CLS09]), wird ebenso dargelegt. Zur Unsicherheitsvisualisierung kommen schließlich einfache **Strokes** zur Anwendung (vgl. [LRS10b]).

- ▷ *Modellmanipulationen* werden in **Kapitel 6** diskutiert. Hierfür werden zwei neue Ansätze vorgestellt, die zum Einen **Phantomzeichnungen** und zum Anderen **Explosionszeichnungen** in Visualisierungsverfahren der Informationsvisualisierung integrieren. Mit beiden Techniken gelingt es, relevante Informationen einer Visualisierung sichtbar zu machen und hervorzuheben. Darüber hinaus, werden Explosionszeichnungen auch dazu genutzt, um neben den Daten auch das Verständnis der eigentlichen Visualisierungstechnik zu fördern.

Die Anwendbarkeit von Phantomzeichnungen und Explosionszeichnungen in einer illustrativen Informationsvisualisierung wurde mit zwei Publikationen belegt (vgl. [LS07b] und [LS08a]). Eine Weiterentwicklung der Explosionszeichnungen betrifft **zeitliche Zerlegungen** (vgl. [RLTS08]).

- ▷ *Zusätzliche Transformationen* stellen ein Bindeglied zwischen den zusätzlichen Grafikprimitiven, den Modell- und den Bilddaten dar und sind integraler Bestandteil vieler NPR-Verfahren. Sie stellen damit eine wichtige Grundlage dar und sind weniger als eigenständige Verfahren zu betrachten. Dies wird auch durch das erweiterte Data-State-Referenzmodell (vgl. Abb. 3.9) deutlich, das sämtliche Transformationen als integralen Bestandteil beinhaltet. Aus diesen Gründen werden zusätzliche Transformationen nachfolgend nicht eigenständig diskutiert, sondern bei den entwickelten Ansätzen mit betrachtet.

In den folgenden Kapiteln werden die oben genannten Ansätze für die illustrative Informationsvisualisierung präsentiert. Jedes Kapitel gibt dabei zunächst einen Überblick über die im entsprechenden NPR-Bereich entworfenen Verfahren, bevor diese einzeln betrachtet und sich schließlich ausführlich den jeweiligen Schwerpunktthemen zugewendet wird. Alle genutzten NPR-Verfahren, deren Anwendung in einer illustrativen Informationsvisualisierung demonstriert wird, werden hinsichtlich der jeweils adressierten Problemstellung aus dem Bereich der Informationsvisualisierung, der Lösungsansätze sowie der Umsetzung und erzielten Ergebnisse diskutiert. Zusätzlich werden sie in das in diesem Kapitel entwickelte erweiterte Data-State-Referenzmodell eingeordnet. Bei allen gezeigten Beispielen wird vorausgesetzt – wie in der Illustration üblich – dass bereits eine Relevanzbewertung der Daten vorliegt.

4. Bildmanipulationen auf der Ebene der visuellen Repräsentation

In diesem Kapitel werden neue Bildmanipulationsverfahren für die illustrative Informationsvisualisierung vorgestellt. Nach einem einführenden Überblick (Kap. 4.1) werden die entwickelten Ansätze jeweils zusammenfassend dargestellt und hinsichtlich der erzielten Ergebnisse diskutiert (Kap. 4.2). Ausführlicher wird auf ein neu entwickeltes so genanntes *Weaving*-Verfahren eingegangen – einer Bildmanipulation mit der sich gezielt Überlagerungen visueller Repräsentanten behandeln lassen (Kap. 4.3). Dieses Verfahren wurde in der Publikation *A new Weaving Technique for Handling Overlapping Regions* vorgestellt, die in Teil II dieser Arbeit enthalten ist. Das Kapitel schließt mit der Einordnung der neuen Bildmanipulationsansätze in das erweiterte Data-State-Referenzmodell und einer Zusammenfassung (Kap. 4.4).

4.1. Überblick

In den nachfolgenden Abschnitten werden Bildmanipulationsverfahren eingesetzt, um wichtige Problemstellungen in der Informationsvisualisierung zu adressieren:

- Das Kapitel 4.2 widmet sich zusammenfassend drei Ansätzen zur (1) *Hervorhebung relevanter Informationen*, zur (2) *visuellen Trennung relevanter und weniger relevanter Informationen* und zur (3) *Visualisierung von Unsicherheiten*. Die Hervorhebung von Daten beruht auf Halos und wurde zusammen mit den Ergebnissen einer Nutzerstudie veröffentlicht [LS08b]. Die visuelle Trennung wird mit der Anwendung unterschiedlicher Stile unterstützt. Hierbei kommen Kantendarstellungen, Punktzeichnungen, Schraffuren und *Dithering*-Verfahren zum Einsatz. Zur Visualisierung der Unsicherheiten werden die Parameter von Bildmanipulationsverfahren verwendet. Dieser Ansatz zur Bereitstellung zusätzlicher Informationen wird am Beispiel der Aquarellsimulation eingeführt und wurde publiziert [LRS10b].
- Den Schwerpunkt von Kapitel 4 bildet ein neuer Ansatz zur Behandlung von *Überlagerungen visueller Repräsentanten* mit *Weaving*-Verfahren (Kap. 4.3). Dieser Ansatz und die dazu durchgeführte Nutzerstudie werden zusammen mit der zugehörigen Publikation ausführlich betrachtet. Er wurde auf der *AVI 2010* (Advanced Visual Interfaces) vorgestellt [LRS10a] und bereits kurze Zeit später als möglicher Ansatz bei Überlagerungen von Farben zitiert [SSM11].

4.2. Anwendung von Bildmanipulationsverfahren

Die folgenden Abschnitte sollen an drei Beispielen verdeutlichen, dass sich mit Bildmanipulationsverfahren konkrete Problemstellungen aus der Informationsvisualisierung bearbeiten lassen. Dazu werden die neu entwickelten Ansätze jeweils bezüglich der behandelten Problemstellung, des Lösungsansatzes, der Umsetzung sowie der erzielten Ergebnisse an konkreten Datensätzen dargelegt.

4.2.1. Hervorhebung relevanter Informationen durch Halos

Problemstellung Ein wichtiger Aspekt einer *effektiven* Visualisierung besteht in der schnellen Lokalisation wichtiger Informationen. Zu diesem Zweck werden verschiedene Hervorhebungstechniken angewendet (siehe [LH10]). Sie basieren auf lokalen Hervorhebungen wichtiger Informationen (etwa farbige Konturen, veränderte Formen, Pfeile, Vergrößerungen, ...) oder globalen Deakzentuierungen weniger wichtiger Informationen (entsättigte Farben, transparente Darstellung, ...). Obwohl diese Verfahren die Lokalisation von Informationen unterstützen, können sie zu Problemen bei der Interpretation führen: Beispielsweise lassen sich Kontextinformationen nicht für Vergleiche o.Ä. nutzen, wenn sie durch Konturen oder Pfeile verdeckt, verzerrt oder gänzlich ausgeblendet werden. Darüber hinaus, sind die angesprochenen Hervorhebungstechniken in einigen Visualisierungsverfahren prinzipiell kaum anwendbar (z.B. Konturen oder verzerrende Vergrößerungen in pixelbasierten Visualisierungstechniken [Kei00] wegen der kleinen Größe und festen Anordnung der visuellen Repräsentanten).

Lösungsansatz Zusätzlich zu den üblichen Hervorhebungsverfahren in der Informationsvisualisierung werden im NPR so genannte *Halos* eingesetzt. Dies sind örtlich begrenzte Säume um hervorzuhebende Objekte, in welchen der Kontrast durch Aufhellen, Abdunkeln oder Einfärben des Hintergrundes erhöht wird. Hierdurch werden diese Objekte von ihrer Umgebung abgegrenzt und hervorgehoben. Wegen der lokalen Farbmodifikationen auf der Bilddatenebene lassen sich Halos den Bildmanipulationen zuordnen. Durch die Nutzung von Transparenzen bleibt der Kontext im Umfeld der hervorgehobenen Objekte erhalten und es kommt zu keiner vollständigen Überlagerung. Somit stellen sie eine interessante Alternative dar. Sie wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation in Verfahren der Informationsvisualisierung integriert und untersucht (vgl. [LS08b]).

Umsetzung und Diskussion Der entwickelte Ansatz geht von den hervorzuhebenden visuellen Repräsentanten aus, die mittels der *Rendering*-Operatoren in einen Schattenriss – den so genannten *Seed* – überführt werden. In der Bilddatenebene wird auf diesem ein Maximumfilter und ein Gaußscher Weichzeichner angewendet. Ersterer ist nötig, um auch für kleinere visuelle Repräsentanten sichtbare Halos zu erzeugen. Die so aus dem *Seed* erzeugten Säume repräsentieren die Ausbreitung und Transparenz der Halos. Sie werden durch entsprechende Zustandsoperatoren eingefärbt und transparent mit der visuellen Repräsentation auf der Bilddatenebene kombiniert.

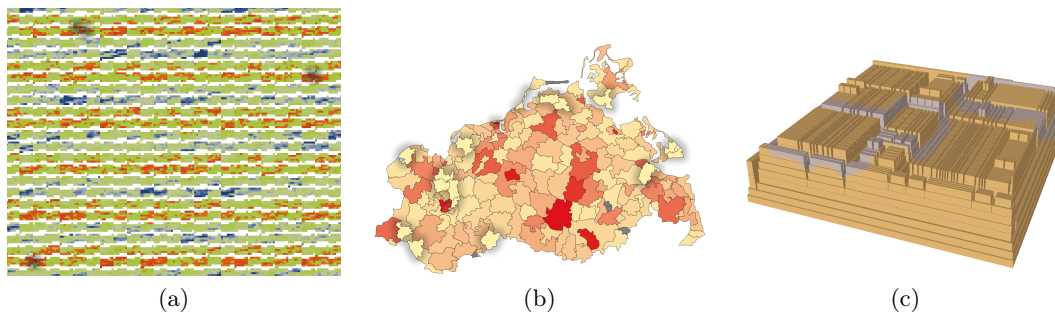


Abbildung 4.1.: Hervorhebung relevanter Informationen durch die Nutzung verschiedener Halos. Diese sind in der Abbildung stärker ausgeprägt, als in der wirklichen Anwendung.

Die so erzeugten Halos wurden im Rahmen dieser Arbeit in pixelbasierten Visualisierungen, Choroplethenkarten aber auch dreidimensionalen *StepTrees* angewendet. Dabei wird die Größe der angesprochenen Filter, die Farbe, die Transparenz und die Kombination auf der Bilddatenebene an die konkrete Visualisierungstechnik angepasst.

- ▷ **Pixelbasierte Visualisierung** Abbildung 4.1(a) zeigt eine pixelbasierte Visualisierung des Klimadatensatzes in der die fünf heißesten Tage – also fünf einzelne Pixel – durch Halos hervorgehoben sind. Dazu werden schwarze Halos mit einer maximalen Deckkraft von 40% eingebracht. Dadurch werden dunklere Bereiche in der Visualisierung erzeugt, aus denen die fünf Pixel hervortreten. Da die Farbskala nur über die Farbwerte interpoliert, bleibt der abgedunkelte Kontext interpretierbar.
- ▷ **Choroplethenkarte** In Abbildung 4.1(b) ist der Gesundheitsdatensatz mit einer Choroplethenkarte dargestellt. Durch die Anwendung größerer abdunkelnder Halos werden die Gebiete mit den wenigsten Grippefllen sichtlich hervorgehoben – auch wenn die Gebiete mit vielen Grippefllen durch intensivere Farben weiterhin auffallen. Dadurch gelingt es, gleichzeitig Gebiete mit hohen und niedrigen Fallzahlen zu betonen.
- ▷ **StepTree** Da Halos auf der Bilddatenebene erzeugt werden, können sie ohne Weiteres auch auf zweidimensionalen Projektionen dreidimensionaler Visualisierungsverfahren genutzt werden. In Abbildung 4.1(c) werden lokal entsttigende Halos in einem *StepTree* genutzt, um ausgewählte Teilbäume hervorzuheben. Durch die reduzierte Farbigkeit im Umfeld der hervorzuhebenden Teilbäume stechen diese hervor.

In jeder dieser Anwendungen gelingt die Hervorhebung, ohne den Kontext auszublenden oder zu verdecken. Dies wird aber nur erreicht, wenn durch die transparenten Halos keine Mischfarben entstehen, die nicht interpretiert werden können. Ein Negativbeispiel ist etwa in [OJS⁺11, S. 875, Abb.2b] zu finden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit einer Nutzerstudie gezeigt, dass Halos die Lokalisation relevanter Informationen unterstützen können. In dieser Studie wurde die Suche

nach vorgegebenen grafischen Objekten in einem zufälligen Bild entweder nicht oder mit verschiedenen Halos unterstützt. Dabei ließ sich die Suchzeit durch Halos auf bis zu 20% der nicht unterstützten Suche reduzieren [LS08b]. Diese publizierten Ergebnisse sind teilweise darauf zurückzuführen, dass die genutzten Halos einen künstlichen Schatten in die Darstellung einbringen (vgl. Abb. 4.1(b)). Dies beeinflusst die Tiefenwahrnehmung und die hervorgehobenen visuellen Repräsentanten erscheinen *vor* dem Kontext, was präattentiv wahrgenommen wird (siehe [HE12]).

4.2.2. Visuelle Trennung durch Anwendung verschiedener Stile

Problemstellung Die visuelle Unterscheidung relevanter und weniger relevanter Informationen kann die Einordnung von Informationen wesentlich unterstützen. Zu diesem Zweck werden in der Informationsvisualisierung bisher hauptsächlich die bekannten visuellen Variablen modifiziert (vgl. [LH10]). Eine solche visuelle Trennung kann jedoch derartig in das *Mapping* eingreifen, dass visualisierte Daten nicht mehr interpretierbar sind – etwa wenn weniger relevante Informationen mit weniger gesättigten Farben oder mit stärkeren Transparenzen dargestellt werden. Deshalb soll an dieser Stelle untersucht werden, wie sich aus dem NPR bekannte Stile für die visuelle Trennung in der illustrativen Informationsvisualisierung nutzen lassen.

Lösungsansatz Als mögliche Alternative werden im NPR zur visuellen Trennung unterschiedliche Stile genutzt. Derartige Verfahren werden bereits in der illustrativen Volumenvisualisierung (siehe Abb. 2.10(b) auf S. 29) und der illustrativen Strömungsvisualisierung (siehe Abb. 2.11(c) auf S. 31) verwendet. Im Rahmen dieser Dissertation wurde eine Software entwickelt, die vier verschiedene Stile mittels entsprechender Bildmanipulationsverfahren umsetzt und anhand einer Choroplethenkarte und eines *StepTrees* beispielhaft in zwei- und dreidimensionale Visualisierungstechniken integriert.

Umsetzung und Diskussion In dieser Arbeit wurden vier Manipulationsverfahren umgesetzt, die auf der Bilddatenebene verschiedene NPR-Stile erzeugen: Punktzeichnungen, Schraffuren, Kantendarstellungen und *Dithering*. Zur Umsetzung der visuellen Trennung müssen diese Stile individuell den visuellen Repräsentanten zugeordnet werden. Dies bedeutet, dass nur begrenzte Bildbereiche in der Bilddatenebene entsprechend modifiziert werden dürfen. Zu diesem Zweck wird ein *ID-Buffer* verwendet, der mittels entsprechender *Rendering*-Operatoren erzeugt wird. Auf die gleiche Weise werden auch weitere benötigte *Buffer* bereitgestellt; etwa *Z*- und *Normalen-Buffer* für die Kantendarstellung. Auf Basis dieser Informationen werden die vier Stile auf der Bilddatenebene mit entsprechenden Zustandsoperatoren umgesetzt (siehe [FS76, ST90, SWHS97, BSD09]).

Um die Visualisierung der relevanten Informationen nicht zu beeinflussen, werden die NPR-Stile stets zur Modifikation der weniger relevanten visuellen Repräsentanten eingesetzt. Dabei ist darauf zu achten, die richtige Balance zwischen der Datendarstellung und der Trennbarkeit der Daten zu finden.

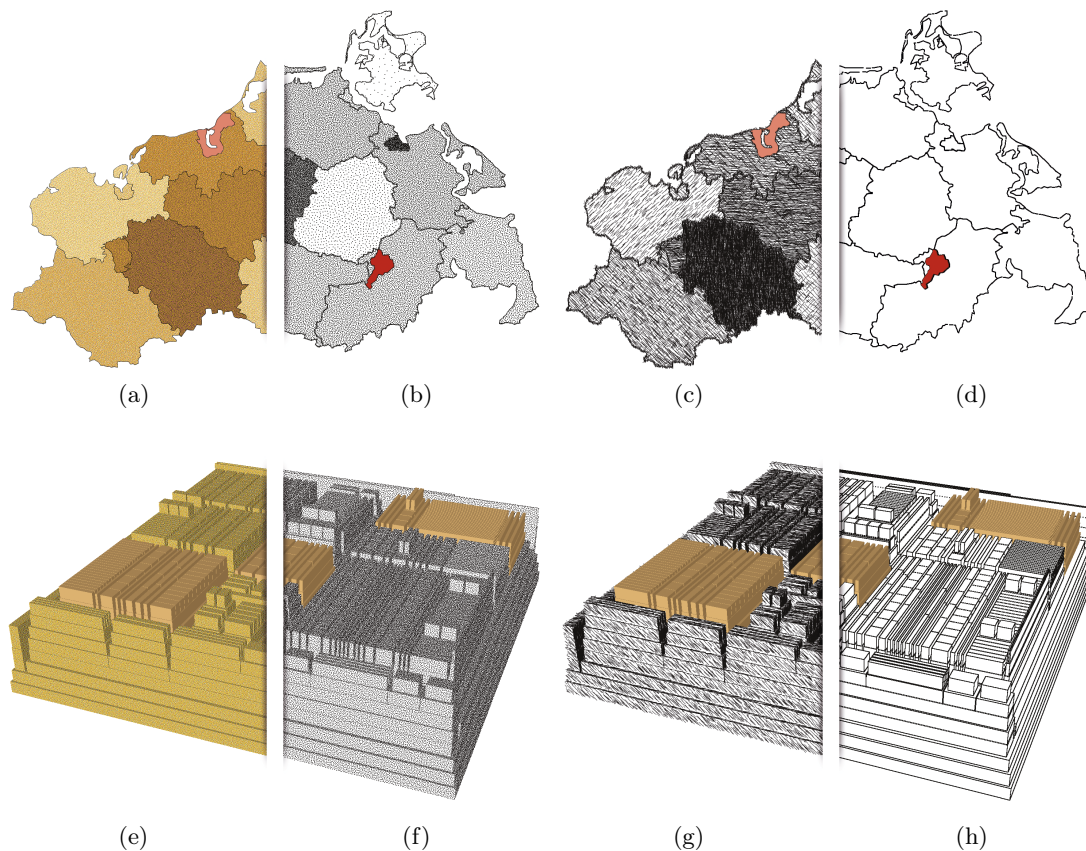


Abbildung 4.2.: Visuelle Trennung durch verschiedene Stile. Mit Anwendung des *Ditherings* (a)+(e), der Punktzeichnungen (b)+(f), der Schraffuren (c)+(g) und Kantendarstellungen (d)+(h) kann das Verhältnis zwischen Datendarstellung (a) und visueller Trennung (d) festgelegt werden.

Abbildung 4.2 verdeutlicht dies. Grundlage der Abbildungen 4.2(a)–(d) bildet eine Choroplethenkarte, die die Anzahl der Grippeerkrankungen in Farben kodiert. In dieser Karte sind zwei Bereiche als relevant markiert und sollen durch die Modifikation der Kontextbereiche visuell von diesen getrennt werden. Bereits durch Anwendung des *Ditherings* und das damit erzeugte Bildrauschen gelingt dies (Abb. 4.2(a)). Da das *Dithering* die ursprünglichen Farbwerte nachbildet, bleiben die visualisierten Daten weitestgehend interpretierbar. Da Farbe stärker trennt, treten die relevanten Gebiete bei der Anwendung von Punktzeichnungen (Abb. 4.2(b)), Schraffuren (Abb. 4.2(c)) und Kantendarstellungen (Abb. 4.2(d)) stärker hervor. Hier sind die Daten im Kontextbereich jedoch nur noch eingeschränkt (bei Punktzeichnungen und Schraffuren) oder nicht mehr interpretierbar (bei der Kantendarstellung).

Auch bei der Visualisierung des phylogenetischen Datensatzes mit dem *StepTree* (Abb. 4.2(e)–(h)) wurden einzelne Teilbäume interaktiv als relevant markiert. Allerdings werden in dieser Visualisierung keine Daten über die Farbe kommuniziert. Deshalb führt eine Farbreduktion durch Punktzeichnungen (Abb. 4.2(f)), Schraffuren (Abb. 4.2(g)) und Kantendarstellungen (4.2(h)) zu keiner Reduktion der dargestellten Informationen. Stattdessen wird in diesen Fällen die visuelle Trennung gegenüber dem *Dithering* (Abb. 4.2(e)) durch die Trennwirkung der Farbe verstärkt.

Es bleibt festzuhalten, dass sich die visuelle Trennung bei entsprechender Sorgfalt durch Anwendung unterschiedlicher NPR-Stile unterstützen lässt. Die hier verwendeten Stile sind allerdings nur für größere visuelle Repräsentanten geeignet und lassen sich nicht in pixel- oder linienbasierten Visualisierungsverfahren anwenden.

4.2.3. Visualisierung von Unsicherheiten mit Bildmanipulationsparametern

Problemstellung Eine wichtige Problemstellung in der Visualisierung ist die Kommunikation der mit den Daten verbundenen Unsicherheiten (z.B. [JP11, HBG⁺12]). Sie können auf allen Stufen des Data-State-Referenzmodells auftreten (z.B. bei Messungen, Aggregationen) und bis zur finalen visuellen Repräsentation propagiert werden. Es existieren verschiedene Ansätze, um Unsicherheiten parallel zu den betroffenen Daten darzustellen (siehe [PWL97]). Da für Daten und Unsicherheiten nur eine begrenzte Anzahl visueller Variablen zur Verfügung steht, ist es mitunter schwer, sie in der visuellen Repräsentation zu trennen und übergreifende Ansätze zu etablieren. MACEACHREN schlägt deshalb weitere visuelle Variablen speziell für die Visualisierung von Unsicherheiten vor [Mac92]. Diese führen zu einer unscharfen, gröberen Darstellung unsicherer Daten. Obwohl dieser Ansatz in einem breiteren Spektrum von Visualisierungen nutzbar ist, gibt es nur wenige Ansätze für solche Darstellungen in der Informationsvisualisierung (z.B. [Kos01, CCP07]).

Lösungsansatz Das NPR bietet mit seiner Vielfalt verschiedener Stile viele Möglichkeiten, unscharfe Darstellungen zu erzeugen. Diese Eigenschaft wird teilweise gezielt in der Illustration genutzt, um Unsicherheiten in dreidimensionalen Modellen zu kommunizieren (z.B. [SSLR96, SMI99]). Die Parametrisierbarkeit der NPR-Verfahren ermöglicht es, neben der Existenz auch die Qualität der Unsicherheiten zu kommunizieren.

Die durch NPR-Verfahren erzeugten unscharfen Darstellungen tragen zu den von MACEACHREN benannten visuellen Variablen bei und stellen eine Möglichkeit dar, Unsicherheiten in der Informationsvisualisierung abzubilden. In dieser Dissertation wurde unter anderem die Bildmanipulation mittels einer Aquarellsimulation zur Visualisierung von Unsicherheiten untersucht und auf einer Choroplethenkarte angewendet (vgl. [LRS10b]).

Umsetzung und Diskussion Zur Visualisierung von Unsicherheiten mit Bildmanipulationsverfahren wurde eine Aquarellsimulation verwendet. Sie erhält die wesentlichen Farbinformationen des Eingabebildes, führt zu einer verwaschenen Darstellung und kann

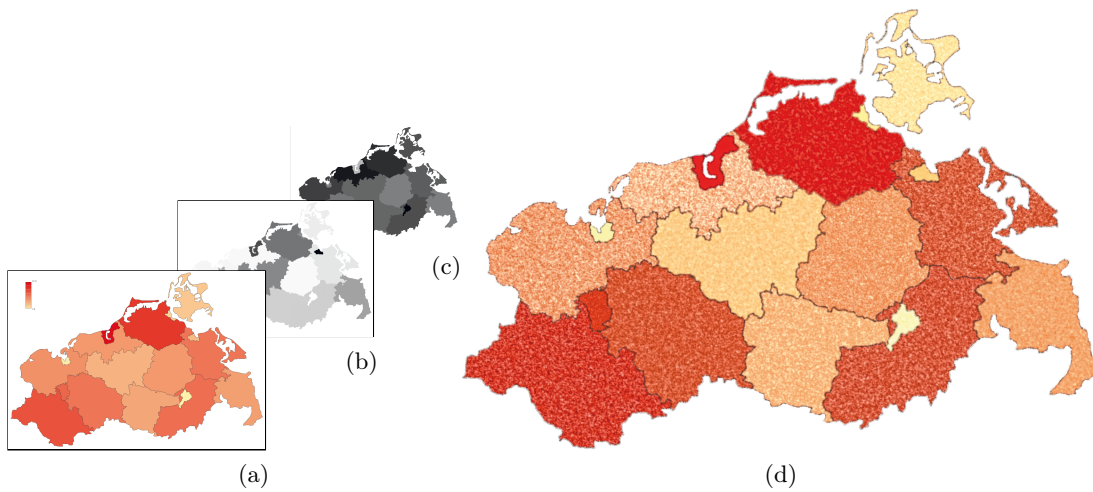


Abbildung 4.3.: Visualisierung von Unsicherheiten mit einer Aquarellsimulation (d). Die Daten (a), Standardabweichungen (b) und *missing values* (c) werden so verknüpft.

zudem vielfältig parametrisiert werden. Für konkreten Umsetzung als Zustandsoperator auf der Bildebene wurde das Simulationsverfahren von SMALL angewendet, da es auf einem Zellulären Automaten basiert und somit eine pixelgenaue individuelle Modifikation der visuellen Repräsentanten auf der Bildebene ermöglicht [Sma91].

Für die pixelgenaue Modifikation ist es notwendig, die entsprechenden Parameter des obigen Ansatz (z.B. Wassergehalt, Absorptionsfähigkeit, Aufnahmekapazität) pixelgenau festzulegen. Zu diesem Zweck werden jedem visuellen Repräsentanten im *Mapping* die entsprechenden Parameter gemäß der assoziierten Unsicherheiten zugewiesen. Diese zusätzlichen Attribute werden mittels der *Rendering*-Operatoren in die Bildebene überführt und der Aquarellsimulation durch entsprechende *Buffer* pixelgenau übergeben.

Der beschriebene Ansatz wurde am Beispiel des Gesundheitsdatensatzes an einer Choroplethenkarte umgesetzt. Abbildung 4.3 verdeutlicht dies. So wird in (a) zunächst die Anzahl der Grippeerkrankungen im Oktober 2000 mittels einer Farbkodierung dargestellt. Die Daten der gezeigten Landkreise wurden aus den zugehörigen Postleitzahlengebieten aggregiert. Allerdings liegen für eine große Zahl der genutzten Postleitzahlengebiete keine Daten vor, was aus der Visualisierung nicht hervorgeht und zu Fehlinterpretationen führen kann. Deshalb werden diese *missing values* (Abb. 4.3(c)) und die Standardabweichung (Abb. 4.3(b)) mittels der vorgestellten Aquarellsimulation kommuniziert (Abb. 4.3(d)). Die beiden genutzten Parameter *Aufnahmekapazität* (von Pigmenten) und *Absorptionsvermögen* (von Wasser) beeinflussen den Grad der Körnung (genutzt für *missing values*) und der Verschommenheit (genutzt für Standardabweichung). So werden die Unterschiede zwischen den verschiedenen Landkreisen hinsichtlich der Unsicherheiten deutlich und die farbkodierten Datenwerte bleiben weitestgehend interpretierbar. Obwohl keine quantitative Einschätzung der Unsicherheitswerte möglich ist, gelingt zumindest eine qualitative Einordnung der *missing values* und Standardabweichungen.

Das wesentliche Problem bei der Nutzung von Bildmanipulationsparametern besteht in der Identifikation derjenigen Parameter, die sich für die Enkodierung weiterer Informationen eignen (vgl. Kap. 3.1). Obwohl die hier genutzte Aquarellsimulation bis zu 11 modifizierbare Parameter zur Verfügung stellt, werden an dieser Stelle lediglich die *Aufnahmekapazität* und das *Absorptionsvermögen* für die Visualisierung der Unsicherheiten genutzt: Die durch sie beeinflussten visuellen Effekte lassen sich voneinander unterscheiden und können zudem in Relation gesetzt werden.

Die betrachtete Aquarellsimulation ist nur für größere flächige visuelle Repräsentanten und nicht für pixel- oder linienbasierte Visualisierungstechniken geeignet, da die erzeugten Effekte nur bei größeren Flächen gut wahrnehmbar sind.

4.3. Neue Weaving-Verfahren zur Behandlung von Überlagerungen

Die Überlagerung visueller Repräsentanten kann die Effektivität herabsetzen, wenn Informationen nur schwer auszumachen sind, und sogar zur Verletzung der Expressivität führen. Aus diesem Grund wurde das *Weaving* – ein weiteres Bildmanipulationsverfahren – untersucht und wesentlich erweitert. Im nachfolgenden Abschnitt werden die wesentlichen Punkte des entwickelten Ansatzes dargestellt (vgl. [LRS10a]).

4.3.1. Problemstellung

Wachsende Datenmengen führen durch die begrenzte Ausgabefläche oft dazu, dass sich visuelle Repräsentanten in der Darstellung überlagern. Dieses Problem tritt auch auf, wenn verschiedenen visuellen Repräsentanten aufgrund der Dateneigenschaften im *Mapping* die gleiche Bildschirmposition zugewiesen wird. Überlagerungen sind zudem ein grundsätzliches Problem in dreidimensionalen Visualisierungen (siehe [CMS99, S.61]).

Für dieses als *Overplotting* bekannte Problem werden mögliche Lösungsansätze etwa in [ED07, Few08] zusammengefasst (vgl. Kap. 2.1.4). Ein einfach umzusetzender Ansatz ist die Verwendung von Transparenzen. Er wird oft genutzt, wenn etwa die visuelle Variable *Position* Daten kodiert und deshalb nicht verändert werden kann. Allerdings modifizieren Transparenzen die Farben der sich überlagernden visuellen Repräsentanten, was zu Fehlinterpretationen führen kann (vgl. [BG04]).

4.3.2. Lösungsansatz

Ein als *Weaving* bekanntes Verfahren stellt eine mögliche Alternative zu Transparenzen dar, das die Farbinformationen im Wesentlichen erhält. Es handelt sich hierbei um ein Bildmanipulationsverfahren, das Bildinformationen aus verschiedenen Quellen in einem einzelnen Ausgabebild durch die Verteilung von Farbinformationen zusammenführt. Hiermit weist es Parallelen zum *Dithering* und der Kunsttechnik des *Papierflechtens*

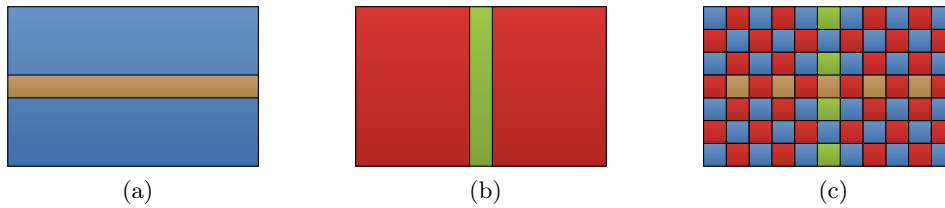


Abbildung 4.4.: Prinzip des Papierflechtens. Verschiedene Bilder (a) und (b) werden miteinander verflochten und sind so nur an bestimmten Positionen sichtbar (c).

auf, die ebenfalls Farbinformationen exklusiv auf diskrete Bildschirmpositionen verteilen (Abb. 4.4). Die Verteilung von Farbinformationen ermöglicht es im *Weaving*, Überlagerungen visueller Repräsentanten aufzuheben. So wird das *Color Weaving* in [UIM⁺03] genutzt, um mehrere skalare Felder gleichzeitig zu visualisieren. Dabei steuern Eigenschaften des visualisierten Strömungsfeldes und eine Zufallsfunktion die Farbverteilung. Dieses *zufällige Weaving* wird auch von HAGH-SHENAS et al. eingesetzt und ist in den dort betrachteten Anwendungsfällen besser zu interpretieren als Transparenzen [HSKIH07]. Ein angepasstes *Dithering* kommt bei BORN et al. zum Einsatz: Der Kontext und die überlagerten relevanten Informationen werden in zwei einfarbige Darstellungen überführt und so kombiniert, dass der Kontext und die sonst überlagerten Informationen sichtbar sind [BWF⁺10]. Die Vergrößerung in Abbildung 2.11(c) auf S.31 verdeutlicht dies.

Die genannten Ansätze betrachten aber nur Spezialfälle (kongruente Flächen, einfarbige visuelle Repräsentanten). Deshalb wurden in dieser Arbeit neue *Weaving*-Ansätze für eine allgemeine Anwendung in der illustrativen Informationsvisualisierung entwickelt.

4.3.3. Umsetzung und Diskussion

Das *Weaving* führt auf der Bilddatenebene mehrere Eingabebilder in einem Ausgabebild zusammen. Für das Zusammenführen der Bildebenen und die damit verbundene Bestimmung der Farbwerte an jeder Bildschirmposition wird eine Auswahlfunktion verwendet. Sie wählt eine der Ebenen aus und stellt deren Farbinformation an der jeweiligen Position dar. Dabei führt das *Weaving* nur dort zu Veränderungen, wo tatsächlich Überlagerungen auftreten. Das erzeugte Ausgabebild ist wesentlich von (1) der Auswahlfunktion und (2) der Ebenenbelegung abhängig.

4.3.3.1. Existierende und neue Auswahlfunktionen

Die Auswahlfunktion bestimmt in umfassender Weise, wie gut die Inhalte der verschiedenen Bildebenen nach dem *Weaving* erkennbar sind. Die in der Literatur genutzte zufällige Auswahlfunktion wirkt sich negativ auf die Erkennbarkeit von Formen und Farben im *allgemeinen* Fall aus. Die zufällige Ebenenauswahl und die oft geringe Größe der zusammenhängenden Farbflächen führen zu einem Rauschen und ungewollten Vermischen der Farbeindrücke (siehe Abb. 4.5(b)).

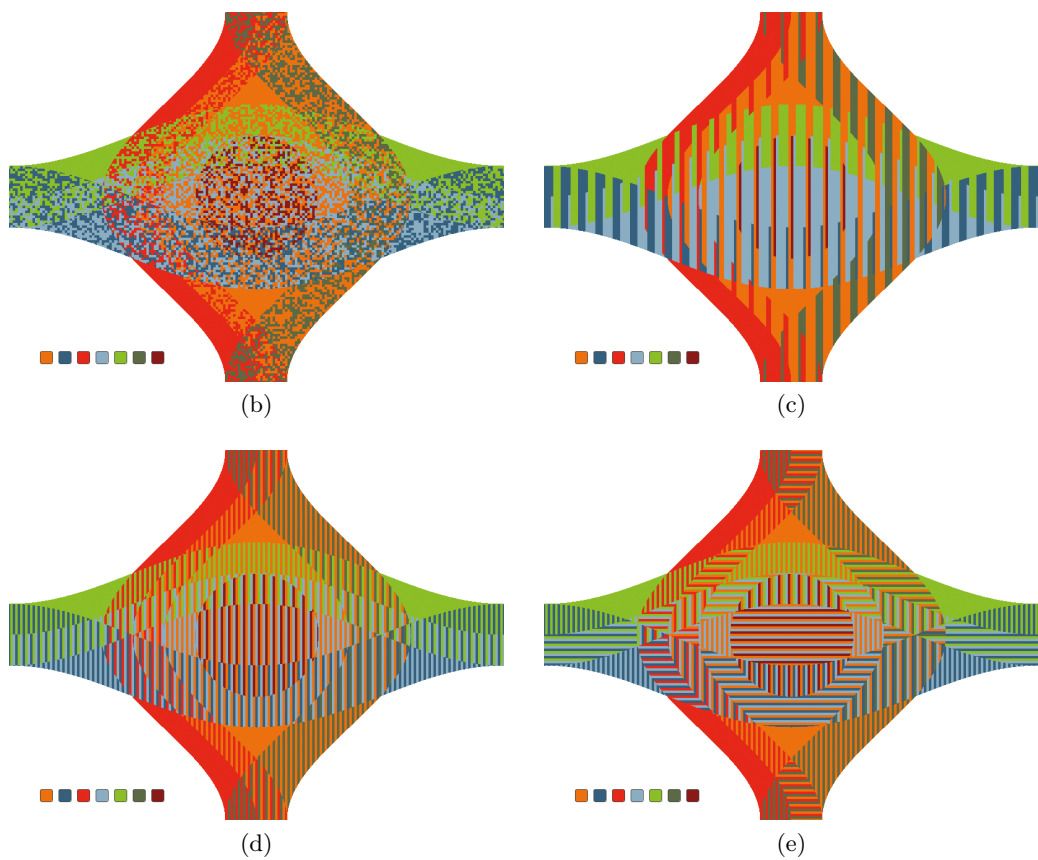
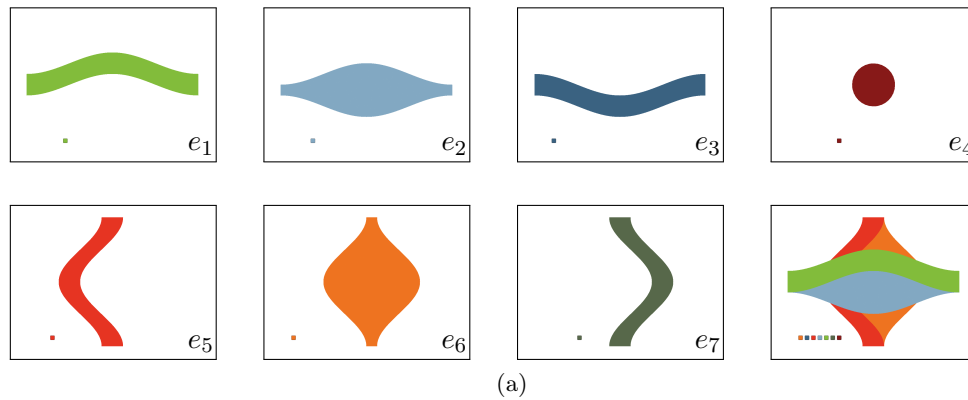


Abbildung 4.5.: *Weaving* mit verschiedenen Auswahlfunktionen. Farbige Objekte auf verschiedenen Ebenen ($e_1 - e_7$) überlagern sich in der Darstellung (a). Gegenüber dem *zufälligen Weaving* (b) verbessert das *statisch ausgerichtete Weaving* (c) die Farberkennbarkeit durch größere zusammenhängende Farbflächen. Diese sind im *dynamisch ausgerichteten Weaving* (d) etwas kleiner, allerdings wird die Auflösung der Forminformationen erhöht. Eine wechselnde Ausrichtung kann die Formerkennbarkeit zusätzlich unterstützen (e).

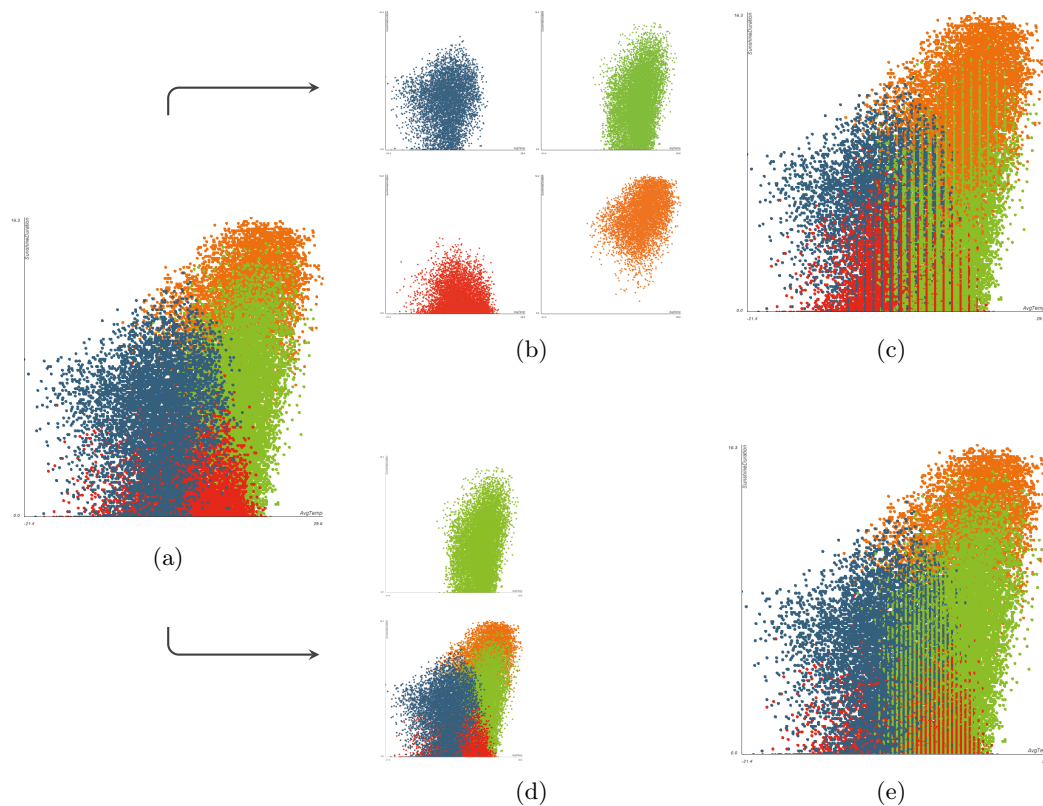


Abbildung 4.6.: Weaving mit verschiedenen Ebenenbelegungen. Werden alle Cluster in einem Punktdiagramm (a) jeweils einer Ebene zugewiesen (b), so werden alle Überlagerungen unter diesen Clustern aufgehoben (c). Mit einer alternativen Aufteilung (d) wird nur das als relevant markierte grüne Cluster in höherer Auflösung freigelegt (e).

Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit zwei neue Auswahlfunktionen entwickelt, die auf eine Verbesserung der Farb- und Formerkennbarkeit zielen. Als wesentlicher Bestandteil dieser neuen Auswahlfunktionen wird die Verteilung der Bildinformationen zeilen- oder spaltenweise an Bildschirmkoordinaten ausgerichtet.

Beim *statisch ausgerichteten Weaving*¹ werden *alle* Bildebenen an jeder Bildschirmposition in Stapeln zusammengefasst. Die Ebenenreihenfolge in benachbarten Stapel verschiebt sich dabei nach einem festen Muster. Von jedem Stapel wird nun die oberste Ebene angezeigt, die an der gegebenen Position Farbinformationen enthält. Durch die deterministische Sortierung und Ebenenwahl entsteht ein Streifenmuster, welches das Rauschen sichtbar reduziert und die Erkennbarkeit der Farben und Formen verbessert (vgl. Abb. 4.5(c)). Die statische Ausrichtung führt jedoch dazu, dass einzelne visuelle Repräsentanten ungewollt hervortreten und in verschiedenen Bildbereichen unterschied-

¹Ursprünglich wurde dieses Verfahren als *Stack-Aligned Weaving* eingeführt (siehe [LRS10a]).

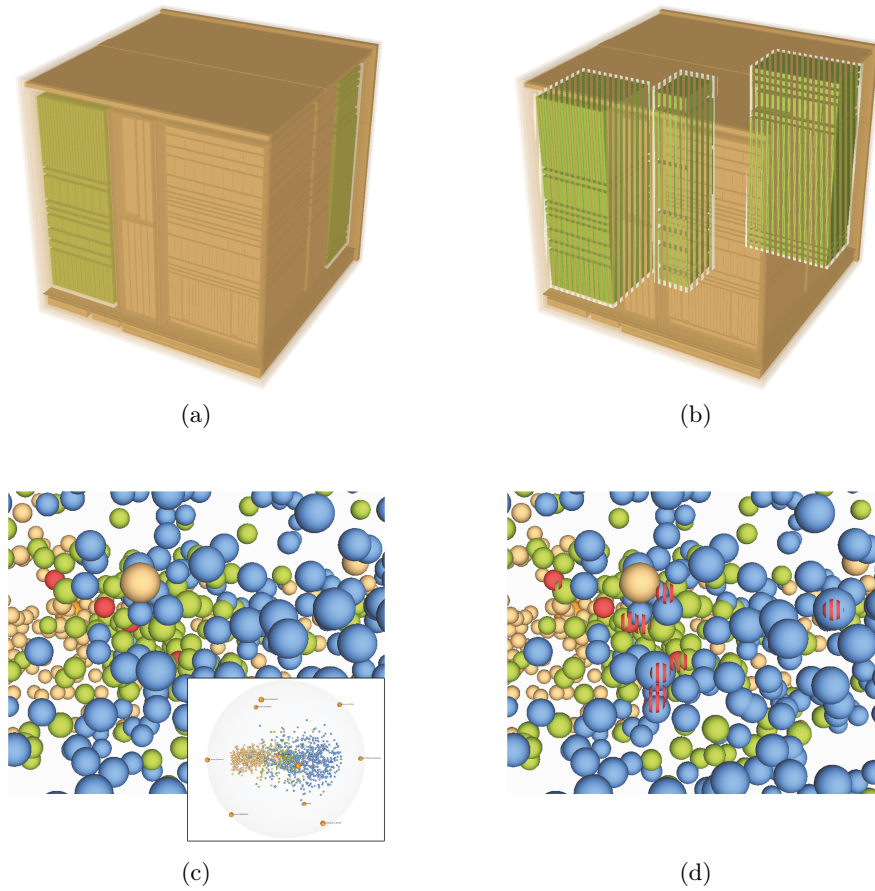


Abbildung 4.7.: Angewandtes *Weaving*. Als relevant markierte Informationen ((a)+(b): grün, (c)+(d): rot) werden durch das *Weaving* freigelegt, ohne dabei Mischfarben zu erzeugen. Es ist anzumerken, dass die Auflösung des *Weavings* in den Beispielen herabgesetzt wurde, um den Effekt in der Abbildung sichtbar zu machen.

lich stark repräsentiert werden (z.B. die hellblaue Figur in Abb. 4.5(c)). Zudem ist die Auflösung der Forminformationen von der Anzahl aller Bildebenen abhängig.

Das deshalb entwickelte *dynamisch ausgerichtete Weaving*² betrachtet stattdessen nur noch diejenigen Bildebenen, die an einer Bildschirmposition auch Farbinformationen enthalten. Auf diese Weise wechseln sich im Streifenmuster nur die lokal an der Überlagerung beteiligten Ebenen ab. Dies verfeinert das Streifenmuster welches nun zusätzlich an den Grenzen der Überlagerungen unterbrochen wird. Auf diese Weise lässt sich die Erkennbarkeit der Forminformationen erhöhen und es tritt keine Ebene beziehungsweise kein visueller Repräsentant stärker hervor (vgl. Abb. 4.5(d)). Gegenüber dem statisch ausgerichteten *Weaving* wird das Bildrauschen leicht verstärkt.

²Ursprünglich wurde dieses Verfahren als *Modulo-Aligned Weaving* eingeführt (siehe [LRS10a]).

4.3.3.2. Die Ebenenbelegung

Neben der genutzten Auswahlfunktion, ist das im *Weaving* erzielte Resultat auch von der konkreten Belegung der verschiedenen Ebenen abhängig. So kann mit der Ebenenbelegung festgelegt werden, ob alle Überlagerungen oder nur die Überlagerung einzelner visueller Repräsentanten behandelt werden. Abbildung 4.6 verdeutlicht dies an einem *Scatterplot*. Dieser zeigt die Sonnenscheindauer und die Durchschnittstemperatur des geclusterten Klimadatensatzes. In Abbildung 4.6(b) werden den Clustern jeweils separate Ebenen zugewiesen, dort gerendert und schließlich mit dem statisch ausgerichteten *Weaving* zusammengeführt (Abb. 4.6(c)). Trotz reduzierter Forminformationen wird die Ausdehnung der verschiedenen Cluster deutlich. In Abbildung 4.6(e) wird hingegen nur das als relevant markierte grüne Cluster freigelegt. Dazu wird eine Ebene für das relevante Cluster definiert und eine weitere Ebene, die dieses spezielle Cluster zusammen mit allen anderen Clustern darstellt. Diese zwei Ebenen repräsentieren also zum Einen die überlagerten Informationen und zum Anderen die vollständige visuelle Repräsentation, die die Überlagerungen enthält (siehe Abb. 4.6(d)). Bei der Darstellung werden diese beiden Ebenen mit dem statisch ausgerichteten *Weaving* zusammengeführt. So werden die sonst verdeckten Informationen in die visuelle Repräsentation eingegliedert. Gleichzeitig steigt durch die nun geringere Anzahl der Ebenen die Auflösung der Forminformationen.

4.3.3.3. Ergebnisse

Mit diesen verschiedenen Grundverfahren lassen sich Überlagerungen visueller Repräsentanten aufheben. Abbildung 4.7 demonstriert an zwei konkreten Beispielen, wie einzelne relevante Informationen durch das *Weaving* sichtbar gemacht werden. Bei beiden Verfahren handelt es sich um dreidimensionale Visualisierungen, deren zweidimensionale Projektionen für das *Weaving* genutzt werden:

- ▷ *TreeCube* Abbildung 4.7(a) zeigt (drei) selektierte Teilbäume eines phylogenetischen Datensatzes [FP03], die durch die Überlagerungen im *TreeCube* (vgl. [TON03]) nicht vollständig sichtbar sind. Da nur diese Teilbäume sichtbar gemacht werden sollen, werden sie einmal exklusiv auf einer Ebene dargestellt und einmal in Kombination mit der restlichen Hierarchie. Durch das statisch ausgerichtete *Weaving* werden die sonst überlagerten Informationen nun eingeblendet und sichtbar (Abb. 4.7(b)).
- ▷ *Federkraftbasierte Visualisierung* In dieser dreidimensionalen Visualisierung der Gesundheitsdaten (vgl. [TK98]) wird der gleiche Ansatz wie zuvor gewählt: Die selektierten Informationen (Daten eines Landkreises zu verschiedenen Zeitpunkten) werden einer separaten Ebene zugewiesen und mittels des statisch ausgerichteten *Weavings* in die visuelle Repräsentation integriert und sichtbar gemacht (Abb. 4.7(d)).

Beide Beispiele verdeutlichen, dass das *Weaving* zur Freilegung einzelner Informationen geeignet ist und so deren Lokalisation unterstützt. Zudem ist es nur von den Bildinhalten auf den beteiligten Ebenen und nicht von der genutzten Visualisierungstechnik abhängig.

Bei der Anwendung des *Weavings* entstehen keine Mischfarben wie bei Transparenzen und die Formen der überlagerten visuellen Repräsentanten sind – wenn auch in reduzierter Auflösung – sichtbar. Mit den neuen *Weaving*-Strategien, die gezielt die Farb- und Formerkennbarkeit adressieren, ist das *Weaving* bei Überlagerungen *beliebiger* visueller Repräsentanten nutzbar und stellt eine Alternative zu Transparenzen dar. Das *statisch ausgerichtete Weaving* eignet sich dabei besonders für Szenarien mit hochfrequenten Wechseln, da es weniger Bildrauschen als das *dynamisch ausgerichtete Weaving* erzeugt. Letzteres unterstützt dagegen bei größeren visuellen Repräsentanten die Formerkennbarkeit am besten. Im Gegensatz zu Transparenzen sind beide Ansätze aber nur bei größeren visuellen Repräsentanten nutzbar. Kleinere Repräsentanten können durch die reduzierte Formaflösung überlagert werden. Zudem setzt das *Weaving* hinreichend große Farbunterschiede zwischen den Ebenen voraus, da die Bildebenen sonst sichtbar, durch Maskierungseffekte aber nicht unterscheidbar sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine initiale Nutzerstudie mit 10 Teilnehmern durchgeführt, um herauszufinden, ob das *Weaving* eine bessere Zuordnung von dargestellter Farbinformation zum ursprünglichen visuellen Repräsentanten ermöglicht. Das Ziel der Teilnehmer bestand darin, einen nur teilweise sichtbaren visuellen Repräsentanten zu selektieren. In der Studie konnte gezeigt werden, dass das *Weaving* gegenüber der Transparenz nur eine etwa viertel so große Fehlerquote (falsch selektierte visuelle Repräsentanten) aufweist, aber nur eine geringfügig kürzere Ausführungszeit (ca. 2s) bietet (vgl. [LRS10a]).

Die Farb- und Formerkennbarkeit lässt sich über die vorgestellten Ansätze hinaus weiter verbessern. Eine Verbreiterung der entstehenden Streifen und eine Sortierung der Ebenen entsprechend der enthaltenen Farbinformationen kann etwa die Farberkennbarkeit unterstützen. Ein zusätzlicher Wechsel der Streifenausrichtung (horizontal / vertikal) unterstützt hingegen die Formerkennbarkeit (Abb. 4.5(e)).

Weitere Details zum *Weaving* – z.B. eine formale Beschreibung und ausführliche Informationen zur Nutzerstudie – sind in der Publikation zu finden, die in Teil II dieser Dissertation auf S. 125 wiedergegeben ist.

4.4. Diskussion

4.4.1. Einordnung in das erweiterte Data-State-Referenzmodell

Die hier vorgestellten Ansätze zur Nutzung von Bildmanipulationsverfahren in der illustrativen Informationsvisualisierung beziehen sich auf die Bilddatenebene. Aber auch andere Stufen des erweiterten Data-State-Referenzmodells und entsprechende Transformationen sind eingebunden. Obwohl sich die vorgestellten Ansätze in wesentlichen Punkten unterscheiden, können sie doch alle in drei Phasen unterteilt werden, die sich wie folgt in das erweiterte Data-State-Referenzmodell einordnen:

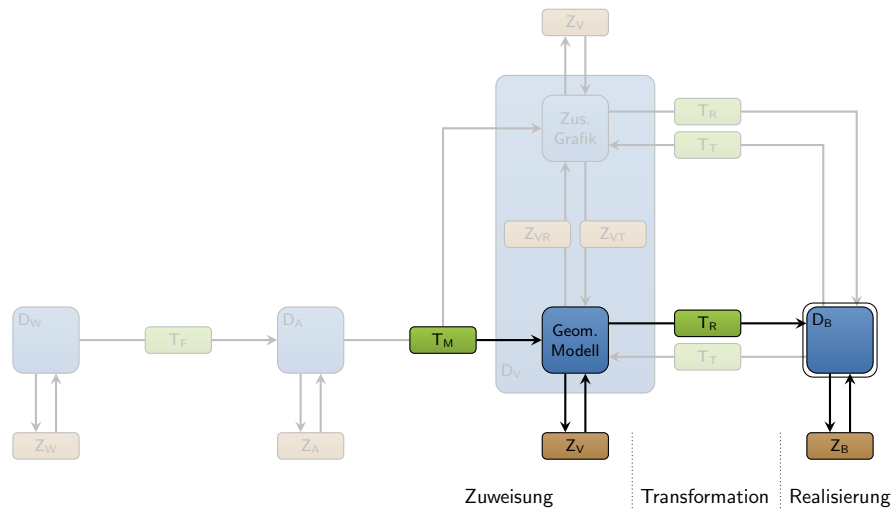


Abbildung 4.8.: Die entwickelten Lösungen im erweiterten Data-State-Referenzmodell. Die vorgestellten Ansätze nutzen das *Mapping*, das geometrische Modell, die *Rendering*-Operatoren und die Bildebene nebst zugehörigen Zustandsoperatoren und können in die Phasen *Zuweisung*, *Transformation* und *Realisierung* gegliedert werden.

- ▷ **Zuweisung** Die verschiedenen Bildmanipulationen beruhen im Wesentlichen auf Dateieigenschaften oder deren Auswertung. Unabhängig davon, ob der konkrete Ansatz nun auf der Relevanz der zu visualisierenden Informationen oder zusätzlichen Informationen wie den Unsicherheiten basiert, sind diese Informationen den entsprechenden Bildmanipulationen bereitzustellen. Dies geschieht durch eine entsprechende Attributierung des geometrischen Modells, die im *Mapping* oder auch im Zustand der visuellen Abstraktion erfolgen kann.
- ▷ **Transformation** Mittels der *Rendering*-Operatoren T_R werden die visuellen Repräsentanten in darstellbare Bilddaten überführt. Je nach Attributierung und schließlich anzuwendendem Bildmanipulationsverfahren werden aber auch weitere *Buffer* angelegt. Diese kodieren etwa Tiefenwerte (z.B. für Kantenextraktion), die Parameter der Bildmanipulationen (z.B. für die Unsicherheitsvisualisierung), die IDs der visuellen Repräsentanten (z.B. für die Nutzung verschiedener Stile) oder die visuellen Repräsentanten selbst (z.B. für Halos, *Weaving*). Die Transformation in Bilddaten stellt so die notwendigen Informationen für die Bildmanipulationen bereit.
- ▷ **Realisierung** Die Umsetzung der Bildmanipulationen erfolgt auf der Bilddatenebene durch entsprechende Zustandsoperatoren Z_B . Dabei werden die durch das *Rendering* bereitgestellten Informationen je nach genutztem Ansatz ausgewertet und die endgültige visuelle Repräsentation erzeugt. Durch entsprechende Implementierung können die Verfahren teilweise auch mit den *Rendering*-Operatoren umgesetzt und beschleunigt werden (z.B. Schraffuren, *Weaving*, Halos, siehe Kap 3.1.2.2).

Der Schwerpunkt aller präsentierten Ansätze basiert auf Bilddaten und begründet die Einordnung als Bildmanipulationsverfahren. Die Kopplung steuernder Parameter an die visuellen Repräsentanten und deren Transformation in den Bildraum sind Einflussfaktoren, die das Resultat weitreichend beeinflussen können. Abbildung 4.8 verdeutlicht die Einordnung in das erweiterte Data-State-Referenzmodell.

4.4.2. Ergebnisse und Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Ansätze nutzen Bildmanipulationsverfahren um die Aussagekraft der visuellen Repräsentation zu erhöhen. Dazu gehören die Hervorhebung visueller Repräsentanten, die Behandlung von Überlagerungen visueller Repräsentanten und die Visualisierung von Unsicherheiten. Im Gegensatz zu etablierten Techniken erlauben Halos etwa die Akzentuierung einzelner Pixel oder Linien, ohne den Kontext vollständig zu überlagern, auszublenden, oder den visuellen Repräsentanten der hervorzuhebenden Informationen zu verändern. Bildmanipulationen wie etwa die Aquarellsimulation erlauben die Darstellung mehrerer Unsicherheitswerte parallel zu den Daten und sind dabei nicht an eine einzelne Visualisierungstechnik gebunden. Das *Weaving* ermöglicht die Behandlung von Überlagerungen, ohne dabei Mischfarben zu erzeugen oder Positionen visueller Repräsentanten zu ändern. Zusammenfassend können mit den präsentierten Ansätzen relevante Informationen gezielt hervorgehoben und freigelegt werden, um hierdurch ihre Lokalisation zu unterstützen oder zusätzliche Informationen in die Visualisierung eingebracht werden, die bei der Interpretation der Daten helfen. Die Bildmanipulationsverfahren unterstützen somit die Kommunikation von Informationen und sind der illustrativen Informationsvisualisierung zuzuordnen.

Auch aktuelle Publikationen zur Visualisierung von Unsicherheiten [BBIF12] oder etwa zur Hervorhebung einzelner Pixel [OJS⁺11] setzen mittlerweile auf Verfahren, die den im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Ansätzen ähneln. Dies unterstreicht die Sinnfälligkeit der entwickelten Lösungen und entspricht den Ergebnissen der durchgeführten Studien, die den Nutzen (z.B. bei Halos) und sogar den Vorteil gegenüber etablierten Verfahren der Informationsvisualisierung belegen (z.B. *Weaving* vs. Transparenzen). Die entwickelte Visualisierung von Unsicherheiten mittels NPR-Verfahren wurde in wesentlichen Punkten durch BOUKHELIFA et al. bestätigt [BBIF12].

Ein wesentlicher Aspekt bei der Anwendung der Bildmanipulationsverfahren ist die weitreichende Parametrisierbarkeit der NPR-Verfahren. Sie erlaubt beispielsweise die einfache Anpassung des genutzten Bildmanipulationsverfahrens an verschiedene Visualisierungstechniken und erschließt somit weitreichende Anwendungsgebiete (z.B. Halos zur Hervorhebung von punktförmigen, linienförmigen und flächigen visuellen Repräsentanten in 2D und 3D). In gleichem Maß können die Verfahren aber auch falsch parametrisiert werden und zu nicht expressiven Visualisierungen führen – etwa wenn durch eine ungünstige Farbwahl die Datenwerte verfälscht werden, im *Weaving* die relevanten Informationen nicht sichtbar werden oder die Visualisierung von Unsicherheiten am Ende die Visualisierung der eigentlichen Daten überdeckt. Die Abbildungen dieses Kapitels zeigen aber, dass bei sinnvollen Parametrisierungen sehr gute Ergebnisse erzielt werden können.

5. Zusätzliche Grafikprimitive auf der Ebene der visuellen Abstraktion

In diesem Kapitel wird die Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive für die illustrative Informationsvisualisierung vorgestellt. Zunächst erfolgt ein einführender Überblick über die entwickelten Ansätze (Kap. 5.1), die anschließend zusammenfassend dargestellt und hinsichtlich der erzielten Ergebnisse diskutiert werden (Kap. 5.2). In Kapitel 5.3 wird ausführlich auf ein neu entwickeltes globales Beschriftungsverfahren eingegangen. Mit diesem können Beschriftungen – die den zusätzlichen Grafikprimitiven zugeordnet werden – ohne Überlagerung anderer visueller Repräsentanten platziert werden. Dieses Beschriftungsverfahren wurde in *Particle-Based Labeling: Fast Point-Feature Labeling without Obscuring Other Visual Features* publiziert und ist in Teil II dieser Arbeit enthalten. Abschließend werden die entwickelten Ansätze zur Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive in das erweiterte Data-State-Referenzmodell eingeordnet und zusammengefasst (Kap. 5.4).

5.1. Überblick

In den nachfolgenden Abschnitten werden zusätzliche Grafikprimitive in Hinblick auf unterschiedliche Problemstellungen in der Informationsvisualisierung eingesetzt:

- In Abschnitt 5.2 werden zunächst drei Ansätze zur (1) *Visualisierung von Unsicherheiten*, zur (2) *Interaktiven lokalen überlagerungsfreien Beschriftung* und zur (3) *Visuellen Beruhigung sich ändernder Beschriftungen* zusammengefasst. Die Visualisierung der Unsicherheiten beruht auf der Modifikation von *Strokes* und wurde zusammen mit der in Kapitel 4.2.3 genutzten Aquarellsimulation vorgestellt (vgl. [LRS10b]). Die lokale überlagerungsfreie Beschriftung erweitert Verfahren wie das bekannte *Tool-Tip-Labeling* und *Excentric Labeling* um eine Berücksichtigung visueller Repräsentanten (vgl. [FLH⁺06]). Um sich ändernde Beschriftungen – gerade in interaktiven Umgebungen wie der Informationsvisualisierung – visuell zu beruhigen, wird schließlich ein neues Animationsverfahren genutzt. Es bildet damit Ansätze aus illustrativen Beschriftungsverfahren nach (vgl. [CLS09]).
- Ein neues Verfahren zur globalen überlagerungsfreien Beschriftung bildet den Schwerpunkt von Kapitel 5. Es ermöglicht die schnelle globale Positionierung vieler Beschriftungen *ohne* Vorberechnungen unter gleichzeitiger Berücksichtigung visueller Repräsentanten. Es zeichnet sich im Vergleich zu anderen Verfahren durch die hohe Anzahl platzierter Beschriftungen und durch die geringe benötigte Rechenzeit

aus. Dieses Beschriftungsverfahren wurde ebenfalls publiziert (vgl. [LSC08]) und bereits kurze Zeit später in einem umfassenden englischsprachigen Lehrbuch [Mun09b] als einzige Beschriftungsmethode für die Visualisierung angeführt. Ebenso wird es als einziges Verfahren in einem *Survey* zur Informationsvisualisierung [Che10] genannt. Das neu entwickelte Beschriftungsverfahren wird inzwischen in weiteren Ansätzen der Informationsvisualisierung verwendet (u.a. [LSST11, SHS11b, LZP⁺12, TBK⁺12, PPBT12]). Abschnitt 5.3 stellt dieses Verfahren ausführlicher vor.

5.2. Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive

Die folgenden drei Beispiele verdeutlichen, dass sich zusätzliche Grafikprimitive und entsprechende Positionierungsverfahren zur Behandlung konkreter Problemstellungen aus der Informationsvisualisierung verwenden lassen. Zu diesem Zweck werden jeweils die behandelte Problemstellung, der Lösungsansatz, die Umsetzung sowie die erzielten Ergebnisse an konkreten Datensätzen diskutiert.

5.2.1. Visualisierung von Unsicherheiten mit Strokes

Die Visualisierung von Unsicherheiten ist ein aktuelles Problem und wurde bereits in Kapitel 4.2.3 ausführlich besprochen. An dieser Stelle soll ein weiterer Lösungsansatz vorgeschlagen werden, der mit Hilfe zusätzlicher Grafikprimitive, in diesem Fall mit *Strokes*, das Problem speziell für linienhafte visuelle Repräsentanten löst.

Lösungsansatz Linienhafte visuelle Repräsentanten sind eine wichtige Form, Daten zu kommunizieren – zum Beispiel in Parallelen bzw. Sternförmigen Koordinaten, in der Trajektorienvisualisierung, in so genannten *Node-Link*-Diagrammen usw. Um Unsicherheiten zu visualisieren, die mit diesen visuellen Repräsentanten assoziiert sind, werden die linienhaften visuellen Repräsentanten als *Reference Backbone* eines *Skeletal Stroke* aufgefasst und durch ein neues Grafikprimitiv, den *Stroke*, ersetzt. Auf diese Weise lassen sich verschiedenste *Strokes* und ihre Parameter für die Unsicherheitsvisualisierung verwenden, während der ursprüngliche Linienverlauf weiterhin kommuniziert wird (vgl. [LRS10b]). Dieser Ansatz wird an Parallelen Koordinaten eingeführt.

Umsetzung und Diskussion In linienbasierten Visualisierungsverfahren werden oft dünne Linien genutzt, um unnötige Überlagerungen bei größeren Datensätzen zu vermeiden. Um dies auch bei der Nutzung von *Strokes* zur Unsicherheitsvisualisierung zu gewährleisten, werden nachfolgend verwackelte Linien als *Stroke* genutzt. Der hierfür verwendete Ansatz (aus [SS02]) bietet mit dem Grad der Verwackelung (im Wesentlichen die Amplitude und Frequenz der Unterteilung) und einer möglichen Punktierung der Linien zwei Attribute zur Unsicherheitsvisualisierung.

Abbildung 5.1 verdeutlicht diesen Lösungsansatz. Hier wird der Gesundheitsdatensatz mittels Paralleler Koordinaten dargestellt. Jeder einzelne Streckenzug repräsentiert da-

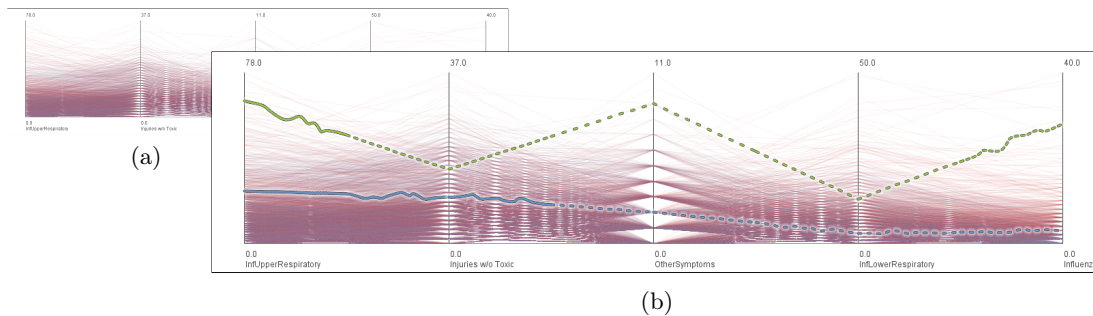


Abbildung 5.1.: Visualisierung von Unsicherheiten mit verwackelten Linien. Die punktierten und verwackelten Linien (b) verdeutlichen Unsicherheiten, die nach der Aggregation in den Parallelen Koordinaten zunächst nicht sichtbar sind (a).

bei die aggregierten Werte (Grippefälle, Verletzungen,...) eines Landkreises an einem einzelnen Tag. Jeder Tag des Jahres 2000 ist dargestellt. Die Aggregation beruht auf den zugehörigen Postleitzahlengebieten. Einzelne Postleitzahlengebiete stellen zu verschiedenen Zeitpunkten keine Fallzahlen bezüglich einzelner Diagnosen bereit. Diese *missing values* und auch die unterschiedlich stark ausgeprägten Standardabweichungen sind der Visualisierung *nicht* zu entnehmen (Abb.5.1(a)).

Deshalb werden die *missing values* eines Attributes in Abbildung 5.1(b) auf immer größere Lücken innerhalb der Linien abgebildet. Die Standardabweichung bestimmt den Grad der Verwackelung. Die Streckenzüge werden mittig zwischen den Achsen unterteilt, um die Unsicherheiten bezüglich der jeweils angrenzenden Attribute darzustellen. Mehrere verwackelte Linien können sich zwar nicht durch ihre definierte Linienstärke, schnell aber durch ihren komplexen Verlauf überlagern. Hinzu kommt, dass die hier verwendeten verwackelten Linien nur in einem Umfeld überwiegend gerader Linien auffallen und es schnell zur Verdeckung durch Maskierung kommt (vgl. Kap. 2.1.4). Deshalb werden Unsicherheiten in Abbildung 5.1(b) nur für interaktiv selektierte Streckenzüge darstellt. So wird etwa sichtbar, dass sich der grüne und der blaue Streckenzug (Rostock und Greifswald am 10.01.2000) nicht nur im Hinblick auf die Datenwerte, sondern auch bezüglich der Unsicherheiten unterscheiden. So liegen in Rostock nur bei den oberen Atemwegserkrankungen keine *missing values* vor (1. Achse) – allerdings mit einer Ungleichverteilung im Stadtgebiet (hohe Standardabweichung über den Postleitzahlgebieten). Diese Ungleichverteilung ist in Greifswald bezüglich der Verletzungen am höchsten (2. Achse) und es liegen insgesamt weniger *missing values* vor. So unterstützt die Unsicherheitsvisualisierung mit *Strokes* die Interpretation der eigentlichen Daten *on demand*.

Wird dieser Ansatz in anderen Visualisierungen – etwa von Trajektorien – genutzt, so können weitere *Stroke*-Parameter als die Verwackelung und Punktierung zur Kodierung der Unsicherheiten genutzt werden. Ein wichtiger Punkt bleibt aber auch hier, dass die erzielbaren Effekte unterscheidbar und von der Datenrepräsentation trennbar sein müssen, um die Effektivität der visuellen Repräsentation zu wahren (vgl. Kap. 3.1).

5.2.2. Überlagerungsfreie lokale Beschriftung

Problemstellung Lokale Beschriftungen sind in vielen Verfahren der Informationsvisualisierung ein wichtiger Bestandteil, um für eine kleine Menge ausgewählter visueller Repräsentanten zusätzliche Informationen zu kommunizieren. Die Auswahl zu beschriftender Objekte erfolgt im Allgemeinen mittels Interaktionstechniken. Gemäß des *Visual Information Seeking Mantras* [Shn96] zählen solche Beschriftungen zu den *Details-on-Demand*-Verfahren.

Hierzu wurden verschiedene lokale Beschriftungsverfahren entwickelt. Dabei werden Beschriftungen meist an frei positionierbaren Zeigern / Linsen angebracht (z.B. *Tool-Tip-Labeling*, *Excentric Labeling* [FP99, BRL09, FHS⁺12]). Diese Verfahren ermöglichen eine Beschriftung, die den Interaktionsanforderungen der Informationsvisualisierung gerecht wird und werden deshalb in verschiedenen Visualisierungssystemen angewendet (z.B. in [EDF08]). Ein Problem dabei ist allerdings, dass nicht betrachtet wird, ob die angebrachten Beschriftungen zu Überlagerungen wichtiger Bildinformationen – insbesondere visueller Repräsentanten – führen und so die Expressivität verletzen.

Lösungsansatz Beschriftungen gehören zu den klassischen Mitteln der Illustration und werden hier so positioniert, dass keine wichtigen Bildinformationen verloren gehen. Die im NPR genutzten Beschriftungsverfahren zielen meist jedoch auf wenige zentral gelegene zu beschriftende Objekte die von Freiraum umgeben sind (z.B. [SCS04, AHS05, GHS07, ČB10]). Dies kann in der Visualisierung im Allgemeinen nicht vorausgesetzt werden.

In der vorliegenden Dissertation wird deshalb untersucht, wie sich eine überlagerungsfreie Beschriftung in die etablierten Beschriftungsverfahren der Informationsvisualisierung – speziell das *Tool-Tip-Labeling* und das *Excentric Labeling* – integrieren lässt. Die Grundlage des hierfür entwickelten Ansatzes (vgl. [FLH⁺06]) bildet das *Dynamic Space Management* [BF00], das für das automatische Layout von Nutzungsschnittstellen und zum Teil auch für die Beschriftung im Bereich der *Augmented Reality* [BFH01] verwendet wird. Der neue Ansatz wird am Beispiel eines Punktdiagramms demonstriert.

Umsetzung und Diskussion Zur Umsetzung der lokalen überlagerungsfreien Beschriftung wird das *Dynamic Space Management* mit dem *Tool-Tip-Labeling* bzw. dem *Excentric Labeling* in einer so genannten *Beschriftungslinse* kombiniert. Diese besteht (1) aus einer Selektionslinse und (2) aus einem Beschriftungsbereich. Mittels der interaktionsgesteuerten Selektionslinse werden ein oder mehrere punktförmige visuelle Repräsentanten ausgewählt, denen im *Mapping* eine entsprechend ausgestaltete Beschriftung, (z.B. Inhalt, Schriftart, Größe, Farbe) zugewiesen wird.

Die Beschriftungen werden im Beschriftungsbereich unter Nutzung des *Dynamic Space Managements* platziert, welches größte freie rechteckige Flächen verwaltet. Um dabei visuelle Repräsentanten zu berücksichtigen, werden sie in so genannte *full space rectangles* überführt und im *Dynamic Space Management* registriert. Zu diesem Zweck werden sie mit speziellen *Rendering*-Operatoren in eine binäre Konfliktkarte auf der Bilddatenebene überführt. Diese wird nun zeilen- oder spaltenweise abgetastet. Belegte Segmente

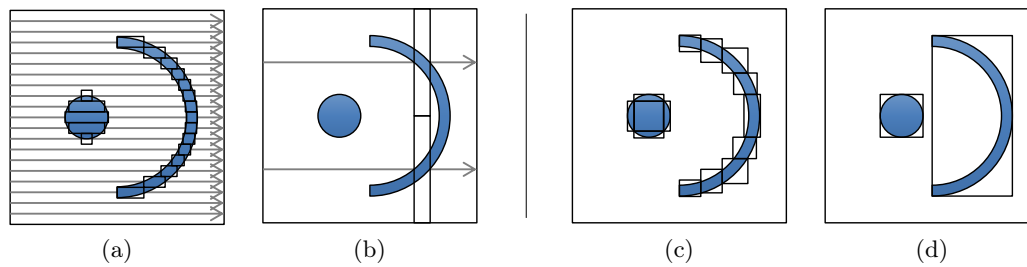


Abbildung 5.2.: Registrierung visueller Repräsentanten im *Dynamic Space Management*. Eine feine Abtastung des Bildraums (links) oder des geometrischen Modells (rechts) stellt sicher, dass alle visuellen Repräsentanten erfasst werden (a) oder dass kein Platz verschwendet wird (c). Größere Abtastungen sind hingegen weniger rechenintensiv (b),(d).

der Abtaststrahlen spannen die genannten *full space rectangles* auf (schwarze Rechtecke in Abb. 5.2). Die Abtastauflösung legt dabei das Verhältnis zwischen benötigter Rechenzeit und der Genauigkeit der Berücksichtigung visueller Repräsentanten fest: Eine feine Abtastung erzeugt viele zu verwaltende Rechtecke und entsprechenden Rechenaufwand – gewährleistet jedoch, dass alle visuellen Repräsentanten berücksichtigt werden (Abb. 5.2(a)). Bei einer groben Abtastung verhält es sich andersherum (Abb. 5.2(b)). Unter den gleichen Bedingungen ist auch eine Abtastung des geometrischen Modells auf der Stufe der visuellen Abstraktion möglich (Abb. 5.2(c), (d)).

Die Schriftplatzierung erfolgt als *Greedy-Algorithmus*: In der Reihenfolge der zu beschriftenden visuellen Repräsentanten wird das *Dynamic Space Management* nach passenden, möglichst nahe liegenden freien Flächen angefragt. Platzierte Beschriftungen werden dann mittels ihrer *Labelbox* – eine übliche rechteckige Approximation der Beschriftung (vgl. [Pet03, S.6]) – als *full space rectangles* im *Dynamic Space Management* registriert und schließlich in die Bildebene überführt. Wird keine adjazente Beschriftungsposition gefunden, so werden zusätzlich verbindende Linien erzeugt und dargestellt.

Mit diesem Ansatz gelingt die lokale überlagerungsfreie Beschriftung punktförmiger visueller Repräsentanten. Abbildung 5.3 verdeutlicht die Vorteile dieses Vorgehens. Der Ausschnitt des Punktdiagramms in Abbildung 5.3(a) zeigt die Durchschnittstemperatur und die Sonnenscheindauer eines Klimadatensatzes, wobei zunächst das *Excentric Labeling* zur Anzeige von Beschriftungen genutzt wird. Dabei werden zahlreiche visuelle Repräsentanten überlagert. Durch den neu entwickelten Ansatz bleiben hingegen alle visuellen Repräsentanten sichtbar (Abb. 5.3(b)). Zudem ist eine freie Platzierung des Beschriftungsbereiches – etwa am Rand der Visualisierung – möglich (Abb. 5.3(c)). Durch den Grad der Abtastung ist diese Methode an die zur Verfügung stehenden Ressourcen (z.B. gegebene Rechenleistung) anpassbar.

Da die freie Fläche im Beschriftungsbereich mit jeder platzierten Beschriftung abnimmt, ist es möglich, dass nicht alle Beschriftungen platziert werden können. Deshalb sollte eine Priorisierung der Annotationen vorgenommen werden.

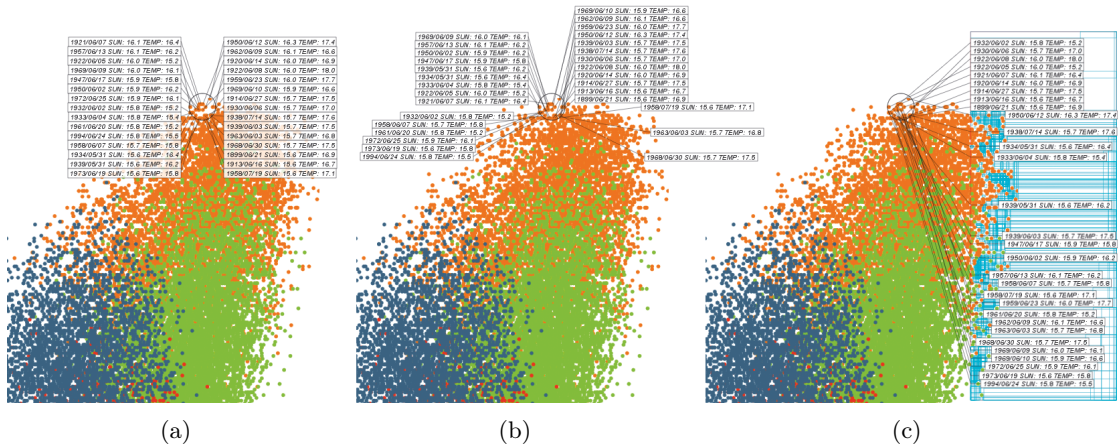


Abbildung 5.3.: Überlagerungsfreie lokale Beschriftung. Während das *Excentric Labeling* bei der Exploration eines Punktdiagramms zur Überlagerung visueller Repräsentanten führt (a), bleiben diese beim hier vorgeschlagenen Ansatz sichtbar (b). Zudem lässt sich der Beschriftungsbereich nun beliebig platzieren (c). Die noch für die Beschriftung zur Verfügung stehenden freien Flächen sind hellblau dargestellt (c).

5.2.3. Zeitlich kohärente Beschriftung

Problemstellung Die Mehrheit existierender Beschriftungsverfahren zielt auf eine möglichst schnelle Beschriftung möglichst vieler Objekte (vgl. [WS09]). Dabei wird in der Regel nur die aktuell vorliegende Situation betrachtet. Werden entsprechende Beschriftungsverfahren (u.a. [CMS95, FP99, RBDN05, Mot07, BRL09, FHS⁺12]...) in interaktiven Umgebungen eingesetzt, so führt die fehlende Berücksichtigung auftretender Änderungen zu einer unruhigen flackernden Beschriftung. Alternative Ansätze, die kontinuierliche Änderungen berücksichtigen, benötigen hingegen Vorberechnungen (z.B. [Pet03, Nie12]), sind nur in speziellen Fällen anwendbar (z.B. in Illustrationen [AHS05, GHS07]) oder berücksichtigen andere Beschriftungskriterien nicht ausreichend (z.B. Zuordbarkeit der Beschriftungen, willkürliche Löschung von Beschriftungen in [VTW12]).

Lösungsansatz Animationen sind ein verbreiteter Ansatz, um spontane oder komplexe Änderungen innerhalb einer visuellen Repräsentation darzustellen. Die wesentliche Idee besteht dabei darin, Änderungen in der Darstellung über die Zeit zu strecken, um sie für den Betrachter nachvollziehbar zu gestalten. Derartige Ansätze kommen etwa bei interaktiven illustrativen Beschriftungsansätzen zur Anwendung (vgl. [AHS05]).

In dieser Dissertation wurde deshalb untersucht, ob ein derartiges Animationsverfahren auch in Beschriftungsverfahren verwendet werden kann, die in der Informationsvisualisierung angewendet werden und daher in der Regel keine *Frame-to-Frame*-Kohärenz gewährleisten können. Das ist etwa bei den oben zitierten Verfahren der Fall.

Umsetzung und Diskussion Die wesentliche Idee des neu entwickelten Verfahrens besteht in der Trennung der aktuell *dargestellten* Beschriftungslösung und der aktuell *errechneten* Beschriftungslösung. Wird nach einer Änderung – etwa durch Interaktionen – eine neue Beschriftungslösung errechnet, so wird sie mit der aktuell dargestellten Beschriftung verglichen. Dabei können für jede Beschriftung folgende vier Fälle eintreten:

- Eine Beschriftung ist durch die neu errechnete Beschriftungslösung erstmalig platziert und somit hinzugefügt worden.
- Eine Beschriftung wurde nicht platziert und ist in der neu errechneten Beschriftungslösung nicht mehr enthalten.
- Eine Beschriftung wurde in der neu errechneten Beschriftungslösung an einer neuen Position platziert.
- Eine Beschriftung wurde nicht verändert und verbleibt an ihrer Position.

Abhängig vom auftretenden Fall erfolgt nun eine zeitliche Spreizung der Änderung mittels entsprechender Animationen: Das aus den ersten beiden Punkten resultierende spontane Erscheinen und Verschwinden von Beschriftungen wird durch ein inkrementelles Ein- bzw. Ausblenden dargestellt. Ein konstanter Faktor bestimmt hierbei die Geschwindigkeit der Animation. Für die Animation der Positionswechsel wird eine Mittelwertberechnung verwendet: Die nächste *dargestellte* Beschriftungsposition ($\mathbf{p}_{show}^{t+1}, \mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$) ergibt sich aus dem geometrischen Mittelwert der aktuell dargestellten Position (\mathbf{p}_{show}^t) und der aktuell errechneten Position (\mathbf{p}_{calc}^t):

$$\mathbf{p}_{show}^{t+1} = \frac{c \cdot \mathbf{p}_{show}^t + \mathbf{p}_{calc}^t}{c + 1}$$

Auf diese Weise wird sofort auf neu errechnete Beschriftungspositionen \mathbf{p}_{calc} reagiert ohne einen neuen vollständigen Animationspfad berechnen zu müssen. Das Gewicht c bestimmt die Geschwindigkeit der Translation.

Die Sichtbarkeitsanpassungen und Neupositionierungen werden nur durch Änderungen angestoßen. Sie werden parallel ausgeführt und so lange wiederholt, bis der Zustand der aktuell errechneten Beschriftungslösung erreicht wird. Der Ablauf der zeitlichen Spreizung wird in Abbildung 5.4 verdeutlicht. Während der Animation kann es kurzzeitig zur Überlagerung anderer Beschriftungen und visueller Repräsentanten kommen, was jedoch nicht ins Gewicht fällt, da die Animation nicht die Grundlage für eine Analyse bildet und nur zur beabsichtigten visuellen Repräsentation hinführt. Sie wird somit im Anschluss der eigentlichen Schriftplatzierung im Zustand der visuellen Abstraktion durchgeführt.

Obwohl die Ursache der fehlenden *Frame-to-Frame*-Kohärenz nicht beseitigt wird, beruhigt die Animation die Beschriftungsdarstellung und macht Änderungen nachvollziehbar. Der neu entwickelte Ansatz ist unabhängig vom verwendeten Beschriftungsverfahren, zielt aber besonders auf schnelle Verfahren, die den Interaktionsanforderungen der Informationsvisualisierung gerecht werden und keine *Frame-to-Frame*-Kohärenz aufweisen (z.B. [FP99, RBDN05, FLH⁺06, Mot07, LSC08, BRL09, FHS⁺12]).

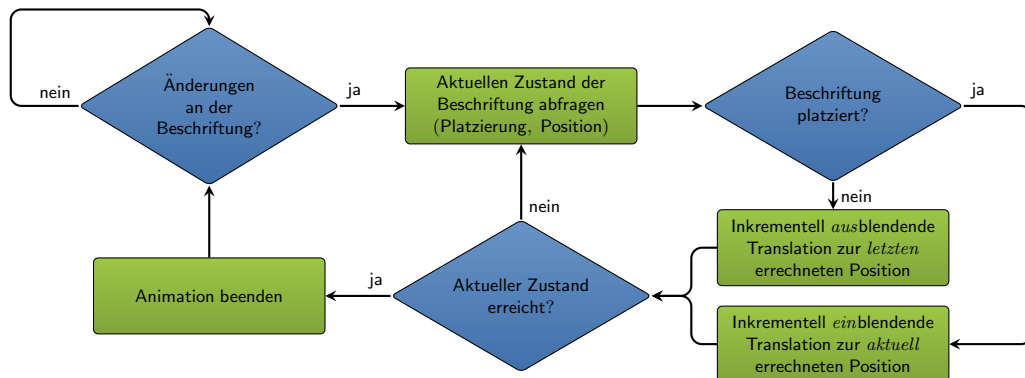


Abbildung 5.4.: Prinzipielle Behandlung wechselnder Beschriftungen. Spontane Beschriftungsänderungen werden durch eine inkrementelle Annäherung an den aktuellen Zustand behandelt. Dieser wird bis zum Abschluss der Animation wiederholt abgefragt. Das Ein- und Ausblenden ist durch eine minimale und maximale Transparenz begrenzt.

5.3. Überlagerungsfreie globale Beschriftung

Beschriftungen sind in vielen Verfahren der Informationsvisualisierung ein wichtiger Bestandteil, um visuellen Repräsentanten Identitäten, numerische Werte und Ähnliches zuzuordnen – unter Anderem durch ihre Ausgestaltung. Nur eine überlagerungsfreie Beschriftung kann aber gewährleisten, dass die Kommunikation von Informationen unterstützt und nicht beeinträchtigt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb ein neues partikelgestütztes Verfahren für eine überlagerungsfreie Beschriftung punktförmiger visueller Repräsentanten entwickelt (vgl. [LSC08]). Es wird hier dargelegt und diskutiert.

5.3.1. Problemstellung

Durch die umfangreiche Beschriftung vieler visueller Repräsentanten unterstützen globale Beschriftungen etwa in *Overview*-Darstellungen die Orientierung und Navigation im Datenraum. Durch die Komplexität des Beschriftungsproblems (NP-vollständig), ist eine schnelle globale Punktbeschriftung nur schwer umzusetzen. Auf Vorberechnungen basierende Verfahren (z.B. [PGP03, BDY06, Nie12]) sind für Visualisierungsverfahren weniger geeignet, da es interaktionsbedingt wiederholt zu umfassenden Änderungen der visuellen Repräsentation kommt, so dass neue Vorberechnungen erforderlich sind. Nur wenig Ansätze ermöglichen eine schnelle globale Beschriftung ohne Vorberechnungen (etwa [RBDN05, Mot07]). Diese erfordern jedoch wenig praktische Einschränkungen an die Schriftgestaltung wie zum Beispiel fixe Beschriftungsabmessungen. Verfahren aus dem NPR zielen wiederum auf die Beschriftung weniger zentral gelegener Objekte ab und sind deshalb nur in Spezialfällen in der Informationsvisualisierung nutzbar.



Abbildung 5.5.: Demonstration einer aktuell genutzten Beschriftung. Die dargestellte Graphvisualisierung ist von XU et al. [XDC⁺13].

Die meisten Beschriftungsverfahren betrachten zudem nur die Überlagerungsfreiheit unter den angebrachten Beschriftungen. Da aber auch Überlagerungen anderer visueller Repräsentanten die Effektivität und Expressivität verletzen können – Abbildung 5.5 verdeutlicht dieses Problem –, ist eine überlagerungsfreie Beschriftung mit Blick auf alle visuellen Repräsentanten wichtig. Dies ist bisher nur durch entsprechenden Rechenaufwand (z.B. in [BHH⁺02, Pet03]) oder in den bereits erwähnten Spezialfällen des NPRs (z.B. [AHS05]) umsetzbar.

5.3.2. Lösungsansatz

Bisherige Beschriftungsansätze versuchen oft, nicht nur eine überlagerungsfreie Beschriftungslösung zu finden, sondern diese auch bezüglich der Beschriftungspositionen zu optimieren (siehe Kap. 2.2.3.6). Dabei werden teilweise Beschriftungspositionen herangezogen, die mit einem höheren Rechenaufwand verbunden sind. Zudem erfassen die meisten Verfahren die Konflikte zwischen Beschriftungen – also deren gegenseitige Überlagerung – nur mittels der rechteckigen *Labelboxen*. Dies erschwert die zusätzliche Berücksichtigung anderer Formen und visueller Repräsentanten (vgl. Kap. 5.2.2).

Aus diesen Beobachtungen ergeben sich die wichtigsten Ideen für ein neues, auf Geschwindigkeit ausgelegtes Beschriftungsverfahren. Sie bestehen darin, den Rechenaufwand bei der Suche nach Beschriftungspositionen zu berücksichtigen, keine aufwendige Optimierung einmal gefundener Lösungen vorzunehmen und Beschriftungskonflikte möglichst flexibel zu modellieren und zu erfassen. Diese Aspekte münden in einem neuen *Greedy*-Algorithmus, dem eine so genannte Beschriftungspipeline und eine partikelgestützte Konflikterkennung zu Grunde liegen.

5.3.3. Umsetzung und Diskussion

Den Ausgangspunkt des Beschriftungsverfahrens bildet eine Liste zu beschriftender punktförmiger visueller Repräsentanten. Diesen wird im *Mapping* eine entsprechend ausgestaltete Beschriftung (z.B. Inhalt, Schriftart, Größe, Farbe) und zusätzlich eine Priorität zugewiesen. Letztere basiert etwa auf der Relevanz der visuellen Repräsentanten oder der Größe zu platzierender Beschriftungen und ermöglicht im Folgenden eine entsprechend bevorzugte Beschriftung – beispielsweise wenn die zur Verfügung stehende Fläche zu klein für alle Beschriftungen ist. Gemäß dieser Priorität werden die zu beschriftenden visuellen Repräsentanten der so genannten Beschriftungspipeline zugeführt.

5.3.3.1. Beschriftungspipeline

Die Beschriftungspipeline definiert eine Abfolge zu testender Positionierungsverfahren, die entsprechend des zu erwartenden Rechenaufwandes geordnet sind. Die in dieser Arbeit entwickelte Beschriftungspipeline umfasst vier Stufen:

1. Beschriftung mit den Positionen des 4-Positionen-Modells,
2. Beschriftung mit den Positionen des 8-Positionen-Modells,
3. Beschriftung mit den Positionen des 4-Slider-Modells,
4. Beschriftung mit externen Beschriftungspositionen.

Die Beschriftungspositionen der Stufen 1–3 sind in Abbildung 2.9 auf S.25 dargestellt. Jede Stufe benötigt im Vergleich zur vorigen weitere arithmetische Operationen, um die zu testenden Beschriftungspositionen zu bestimmen. In der vierten Stufe wird schließlich mit einer Spirale im nahen Umfeld des zu beschriftenden Punktobjektes nach externen Beschriftungspositionen – also Positionen die sich nicht direkt am Punktobjekt befinden – gesucht. Diese Suche ist rechenintensiv aber besonders in Bildbereichen mit vielen visuellen Repräsentanten nützlich, wo Beschriftungen nur selten adjazent anbringbar sind.

Die einzelnen Stufen der Beschriftungspipeline werden wie folgt durchlaufen (vgl. Abb. 5.6): Zunächst wird für *alle* visuellen Repräsentanten der höchsten Priorität auf der ersten Pipelinestufe nach einer konfliktfreien Beschriftungsposition gesucht. Die jeweils erste gefundene Position wird dabei als *endgültige* Beschriftungsposition übernommen. Nur diejenigen visuellen Repräsentanten, die auf dieser Stufe nicht beschriftet werden konnten, werden schließlich der nächsten Pipelinestufe zugeführt und so weiter. Erst wenn alle Stufen für die visuellen Repräsentanten der höchsten Priorität durchlaufen wurden – also alle Möglichkeiten erschöpft sind – werden die visuellen Repräsentanten der nächst niedrigeren Priorität auf die gleiche Weise beschriftet. Dieses Vorgehen steigert die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Platzierung hoch priorisierter Beschriftungen.

Die einzelnen Stufen der Beschriftungspipeline können ausgetauscht und sogar ausgelassen werden. Es ist aber anzumerken, dass sich die hohe Beschriftungsgeschwindigkeit nur dann ergibt, wenn die meisten Beschriftungen auf leicht zu bestimmenden Positionen

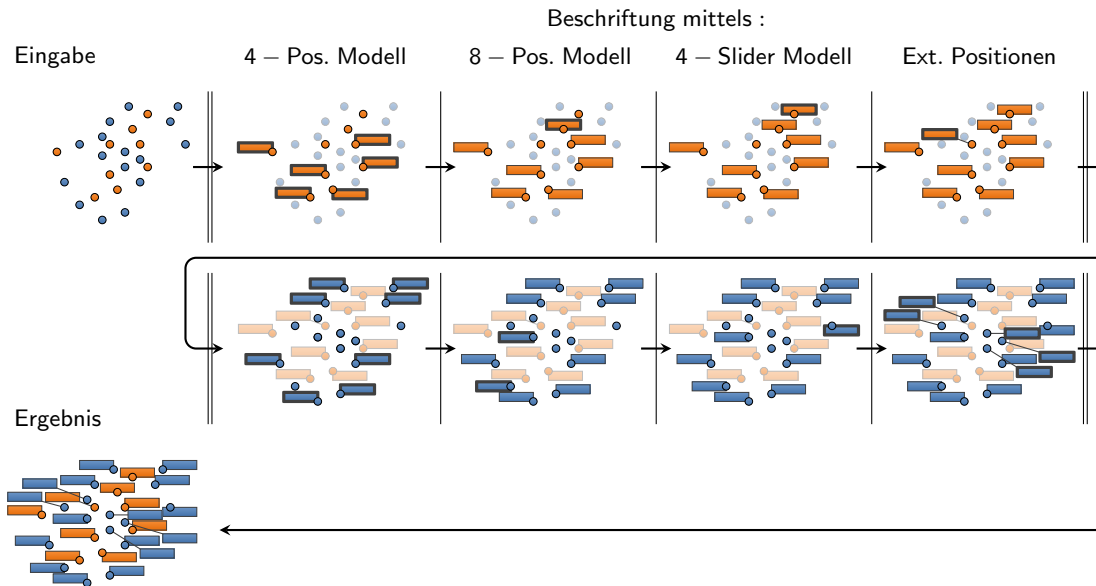


Abbildung 5.6.: Durchlauf der Beschriftungspipeline mit zwei Prioritäten: Als erstes durchlaufen alle Punktobjekte hoher Priorität (orange) die vollständige Beschriftungspipeline, bevor die blauen Punktobjekte beschriftet werden. Auf jeder Pipelinestufe werden Beschriftungen mit dem dort genutzten Positionenmodell platziert (dick umrandete *Labelboxen*). Nur Punktobjekte, die nicht beschriftet werden konnten, werden erneut auf den weiteren Pipelinestufen betrachtet.

platziert werden und sukzessiv komplexere Positionen für jedoch immer weniger Punktobjekte untersucht werden. Durch die erschöpfende Betrachtung adjazenter Beschriftungspositionen sowie das Einbeziehen externer Beschriftungen gelingt es oft, alle visuellen Repräsentanten zu beschriften (siehe Tab. 5.1). Sowohl in der Anzahl konfliktfrei platzierter Beschriftungen als auch in der hierfür benötigten Zeit, werden viele existierende Beschriftungsverfahren *ohne* Vorberechnungen übertroffen (siehe [LSC08] in Teil II).

5.3.3.2. Partikelgestützte Konflikterkennung

Für eine schnelle Beschriftung ist neben der Beschriftungspipeline die effiziente Detektion von Beschriftungskonflikten wichtig. Um zusätzlich beliebige visuelle Repräsentanten bei der Beschriftung berücksichtigen zu können, wurde auf etablierte Überlagerungstests zwischen *Labelboxen* verzichtet und ein partikelgestützter Ansatz entwickelt. Zusammenfassend sieht dieser vor, dass eine Beschriftung nur dann platziert werden kann, wenn sich im anvisierten Beschriftungsbereich kein so genanntes Konfliktpartikel befindet.

Konfliktpartikel repräsentieren somit Darstellungsfläche, die nicht für die Beschriftung genutzt werden kann. Um die Überlagerung bereits platzierter Beschriftungen und visueller Repräsentanten zu verhindern, werden diese durch Konfliktpartikel repräsentiert:

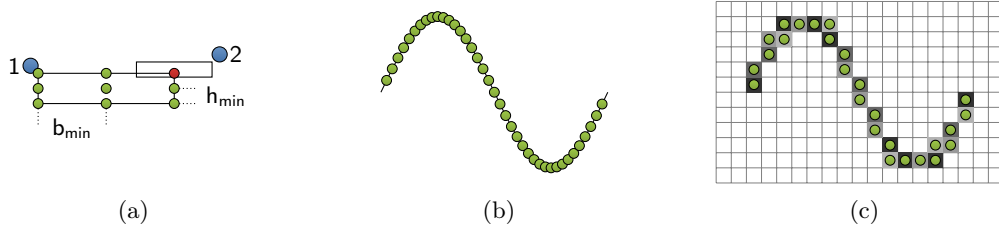


Abbildung 5.7.: Erzeugung von Konfliktpartikeln. Die Labelboxen platzierter Beschriftungen werden mit der minimalen Beschriftungshöhe und -breite abgetastet und in Konfliktpartikel (grün) überführt (a). So können auch die kleinsten später angebrachten Beschriftungen diesen Bereich nicht überlagern und es treten Konflikte auf (rot). Visuelle Repräsentanten können durch Abtastung des geometrischen Modells im Zustand der visuellen Abstraktion (b) oder auf der Bildebene (c) in Konfliktpartikel überführt werden.

- ▷ **Beschriftungen** Die von einer platzierten Beschriftung beanspruchte Fläche – approximiert durch die *Labelbox* – wird mit Konfliktpartikeln abgetastet. Deren Abstand entspricht dabei der kleinsten insgesamt auftretenden Beschriftungshöhe bzw. -breite. So würde auch diese kleinste Beschriftung in der bereits belegten Fläche zu einem Konflikt führen und kann somit nicht dort platziert werden (Abb. 5.7(a)).
- ▷ **Visuelle Repräsentanten** Die Überführung der visuellen Repräsentanten in Konfliktpartikel wird im Zustand der visuellen Abstraktion (vgl. Abb. 5.7(b)) oder auf der Bilddatenebene (Abb. 5.7(c)) umgesetzt. Dazu werden die visuellen Repräsentanten mit Konfliktpartikeln abgetastet. Auch hierbei ist auf die minimalen Beschriftungsdimensionen zu achten, um eine Überlagerung durch die kleinsten Beschriftungen zu vermeiden. Besonders die Abtastung im Bildraum gewährleistet eine große Unabhängigkeit vom genutzten Visualisierungsverfahren: Mittels der *Rending*-Operatoren wird zunächst eine Konfliktkarte auf der Bilddatenebene erzeugt, die die freien Flächen in einer dedizierten Farbe darstellt. Bei Abtastung dieser Karte wird nun überall dort ein Konfliktpartikel erzeugt, wo diese Farbe *nicht* vorkommt. In vielen Fällen genügt bereits eine ausgewiesene Hintergrundfarbe und es ist kein weiterer Eingriff in bestehende Verfahren notwendig.

Die genutzten Konfliktpartikel sind zunächst durch ihre zweidimensionale Position gekennzeichnet und können dynamisch erzeugt oder entfernt werden. Bei Bedarf lassen sich die Konfliktpartikel aber auch selbst mit einer Relevanz attributieren. Dies ermöglicht eine bedingte Überlagerung niedrig priorisierter Konfliktpartikel durch relevante Beschriftungen, wenn für diese etwa keine ausreichende Fläche zur Verfügung steht. Für die effiziente Verwaltung der Konfliktpartikel wird eine gitterbasierte Datenstruktur (siehe [Mot07]) eingesetzt, die nur die für einen Konflikt in Frage kommenden Partikel in der Umgebung einer potentiellen Beschriftungsposition ermittelt.

5.3.3.3. Ergebnisse

Durch das neu entwickelte globale Beschriftungsverfahren gelingt die schnelle Platzierung mehrerer tausend Beschriftungen, ohne visuelle Repräsentanten oder andere Beschriftungen zu überlagern oder die Schriftgestaltung einzuschränken (vgl. Tab. 5.1). Durch Verwendung der Beschriftungspipeline und die Positionsauswahl mittels eines *Greedy-Algorithmus* werden interaktive Frameraten erreicht. Auf diese Weise platzierte Beschriftungen unterstützen wie im NPR die Kommunikation von Bildinformationen, etwa die Navigation im Datenraum oder die Interpretation der Daten.

In den Abbildungen 5.8 und 5.9 sind drei Anwendungsbeispiele gegeben. Um die Vorteile gegenüber klassischen Verfahren hervorzuheben, wurde zu Vergleichszwecken jeweils einmal auf die Berücksichtigung visueller Repräsentanten und auf externe Beschriftungen verzichtet.

- ▷ *Graphvisualisierung I* Abbildung 5.8 greift zunächst das einführende Beispiel aus Abbildung 5.5 auf. Es handelt es sich um die Visualisierung der Musikhörgewohnheiten dreier Personen in einem sozialen Netzwerk. Die 56 anzubringenden Annotationen sowie der Graph und dessen Layout wurden unverändert aus Abbildung 5.5 übernommen. Mittels des vorgestellten Beschriftungsverfahrens gelingt es, zuvor überlagerte Knoten des Graphen sichtbar zu machen (z.B. Sum41, Pantera). Außerdem sind nun alle Beschriftungen lesbar und zuordbar, was die Interpretation der Visualisierung erleichtert.
- ▷ *Graphvisualisierung II* Abbildungen 5.9(a) und (b) zeigen einen zufällig arrangierten ungerichteten Graphen, dessen 112 Knoten häufige Adjektive und Substantive des Romans *David Copperfield* von CHARLES DICKENS repräsentieren. Die 508 Kanten stellen das gemeinsame Auftreten von Adjektiven und Substantiven dar (aus [New06]). Das ohnehin vorhandene *Visual Clutter* wird durch die Beschriftung in 5.9(a) zusätzlich verstärkt und die Verfolgbarkeit der Kanten erschwert. In 5.9(b) wird hingegen keine einzige Kante überlagert, obwohl 100 der 112 Knoten beschriftet sind. Trotz zusätzlicher Linien für externe Beschriftungen wirkt die Visualisierung ruhiger, da ausschließlich freie Flächen für die Beschriftung genutzt werden.

Zu platzierende Beschriftungen											
500		750		1000		100.000		200.000		400.000	
792×612		792×612		792×612		8k×8k		12k×12k		15k×15k	
%	ms	%	ms	%	ms	%	ms	%	ms	%	ms
100,0	2	100,0	4	99,9	10	100,0	769	100,0	1220	100,0	4167

Tabelle 5.1.: Ergebnisse der partikelgestützten Beschriftung. Für verschiedene Beschriftungsmengen wird der Anteil platzierter Beschriftungen (in %) sowie die hierfür benötigte Zeit (in ms) wiedergegeben. Die verwendete Größe der Beschriftungen von 30×7px und die nutzbare Fläche von 792×612px entspricht typischen Testszenarien (vgl. [CMS95]).



Abbildung 5.8.: Überlagerungsfreie Beschriftung einer Graphvisualisierung. Die anzubringenden Annotationen und das Graphlayout wurden vollständig aus Abbildung 5.5 extrahiert. Die überlagerungsfreie Schriftplatzierung resultiert aus der entwickelten globalen Beschriftungsmethode.

- ▷ **Federkraftbasierte Visualisierung** Der neue Beschriftungsansatz kann auch in zweidimensionalen Projektionen dreidimensionaler Visualisierungsverfahren verwendet werden. In Abbildung 5.9(c) und (d) sind die Gesundheitsdaten eines einzelnen Tages in einer federkraftbasierten dreidimensionalen Visualisierung dargestellt (vgl. [TK98]). Durch die Dreidimensionalität kommt es bereits zur Überlagerung visueller Repräsentanten was durch die Beschriftung in (c) weiter verschärft wird. Aufgrund der hohen Dichte visueller Repräsentanten werden dabei nur 129 der sichtbaren 164 Punktobjekte beschriftet. Durch Nutzung des neuen Beschriftungsverfahrens und externer Beschriftungen können in (d) sogar 132 Beschriftungen angebracht werden, wobei gleichzeitig kein einziger visueller Repräsentant durch Beschriftungen überlagert wird.

In den obigen Anwendungsfällen lassen sich viele Beschriftungen erst durch die Einbeziehung externer Beschriftungspositionen platzieren (in 5.9(b) 66% und in (d) ca. 37% der Beschriftungen). Da diese in der Regel mit Verbindungslinien zum Punktobjekt einhergehen, können diese externen Beschriftungen in ungünstigen Fällen das *Visual Clutter* verstärken. Als hilfreich hat es sich hierbei erwiesen, diese Linien zu deakzentuieren (dünn und grau in Abb. 5.8 und 5.9(d)) oder farblich abzuheben (Abb. 5.9(b)).

Mögliche Erweiterungen dieses Verfahrens – etwa zur Beschriftung von Linienobjekten und Flächenobjekten – sowie weitere Anwendungsbeispiele und Testergebnisse bezüglich der Anzahl platzierter Beschriftungen und hierfür benötigter Zeiten sind in der Publikation in Teil II auf S. 127 wiedergegeben.

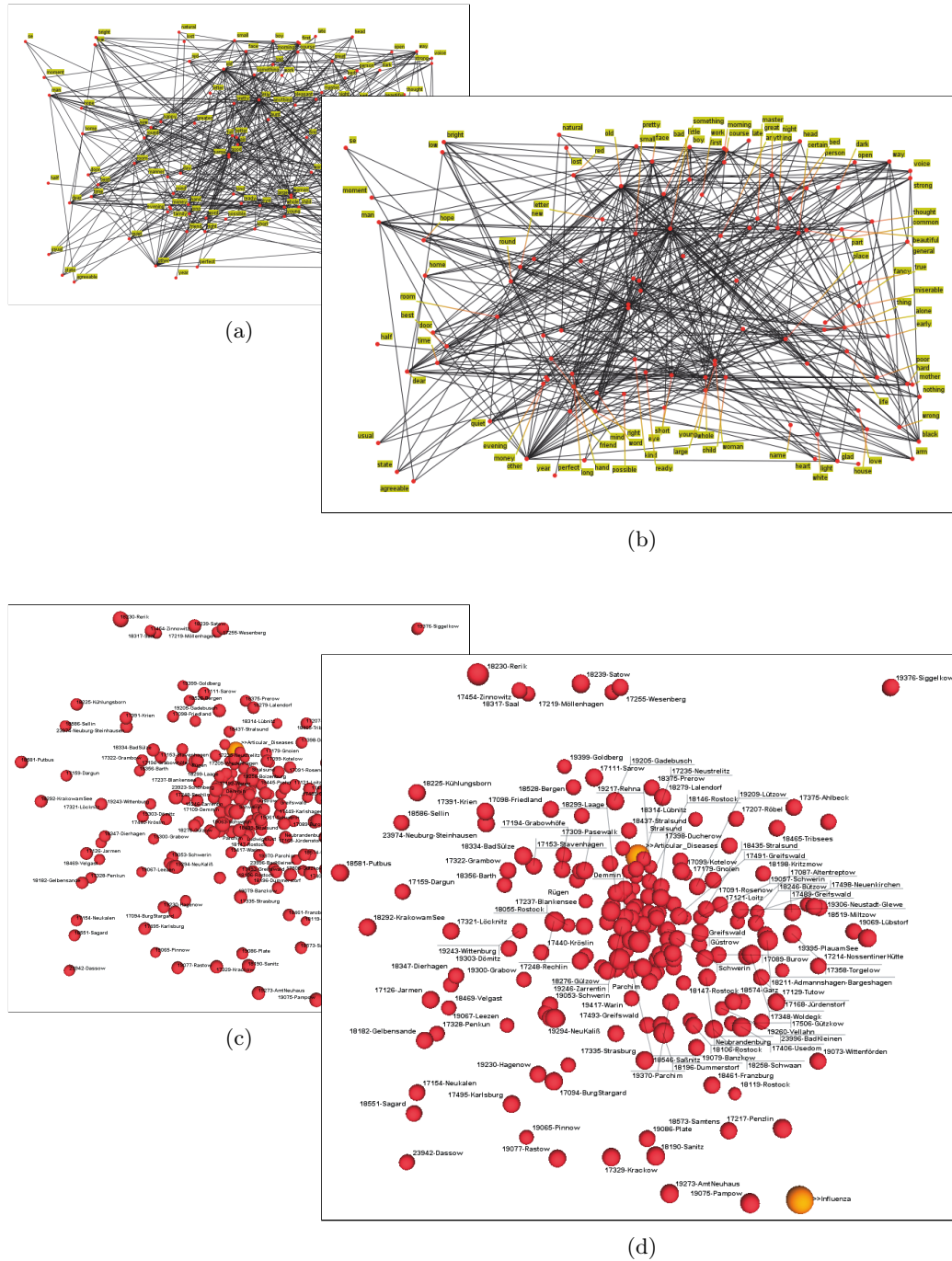


Abbildung 5.9.: Anwendung der überlagerungsfreien globalen Beschriftung in zwei- und dreidimensionalen Visualisierungen. Während die Beschriftungen in (a) und (c) das *Visual Clutter* durch Überlagerungen verstärken, können die visuellen Repräsentanten in (b) und (d), mittels Konfliktpartikeln bei der Schriftplatzierung berücksichtigt werden.

5.4. Diskussion

5.4.1. Einordnung in das erweiterte Data-State-Referenzmodell

Die in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren nutzen zusätzliche Grafikprimitive auf der Stufe der visuellen Abstraktion. Daneben werden weitere Stufen und Transformationen des erweiterten Data-State-Referenzmodells einbezogen. Hier können im Wesentlichen zwei Phasen identifiziert werden:

- ▷ *Erzeugung & Zuweisung* Die Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive beginnt mit deren Erzeugung auf Basis von Dateneigenschaften. Dies geschieht im *Mapping* wo die Daten in Eigenschaften der zusätzlichen Grafikprimitive – etwa *Stroke*-Attribute, Beschriftungsinhalte, Größen, Prioritäten u.s.w. – kodiert und schließlich den visuellen Repräsentanten zugeordnet werden. Als Ergebnis dieser Phase liegen die zusätzlichen Grafikprimitive neben dem geometrischen Modell im Zustand der visuellen Abstraktion vor und kodieren zusätzliche Informationen.
- ▷ *Platzierung* Die zusätzlichen Grafikprimitive werden in das geometrische Modell oder direkt in die Bilddatenebene überführt. Bei diesen Transformationen werden weitere Informationen über die visuellen Repräsentanten oder vorangegangene Beschriftungslösungen benötigt, um diese Informationen jeweils bei der Platzierung zu berücksichtigen. Sie werden entweder (a) direkt auf der Ebene der visuellen Abstraktion oder (b) durch eine separate Überführung der visuellen Repräsentanten in die Bilddatenebene (z.B. bei Konfliktkarten) und eine dortige Analyse bereitgestellt. Die Platzierung zusätzlicher Grafikprimitive umfasst somit den Zustand der visuellen Abstraktion und der Bilddatenebene und beruht auf zusätzlichen Transformationen zwischen und innerhalb dieser Zustände.

Die vorgestellten neuen Ansätze basieren auf zusätzlichen Grafikprimitiven und behandeln deren Integration in verschiedene Visualisierungsverfahren einer illustrativen Informationsvisualisierung. Die Verfahren zeigen zudem, dass nur durch zusätzliche Transformationen etwa eine überlagerungsfreie Schriftplatzierung möglich wird, die die Kommunikation von Information unterstützt und nicht einschränkt. Die hierfür benötigten Stufen des erweiterten Data-State-Referenzmodells werden in Abbildung 5.10 hervorgehoben.

5.4.2. Ergebnisse und Zusammenfassung

Mit den hier vorgestellten Ansätzen zur Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive gelingt es, zusätzliche Informationen in visuelle Repräsentationen zu integrieren. Dazu gehört die Visualisierung von Unsicherheiten und die Schriftplatzierung unter Berücksichtigung visueller Repräsentanten. So lassen sich *Strokes* und deren Parameter für die gezielte Modifikation linienhafter visueller Repräsentanten nutzen, wobei die sich hierbei erzielbare verwackelte Repräsentation für die Unsicherheitsvisualisierung eignet. Obwohl nur

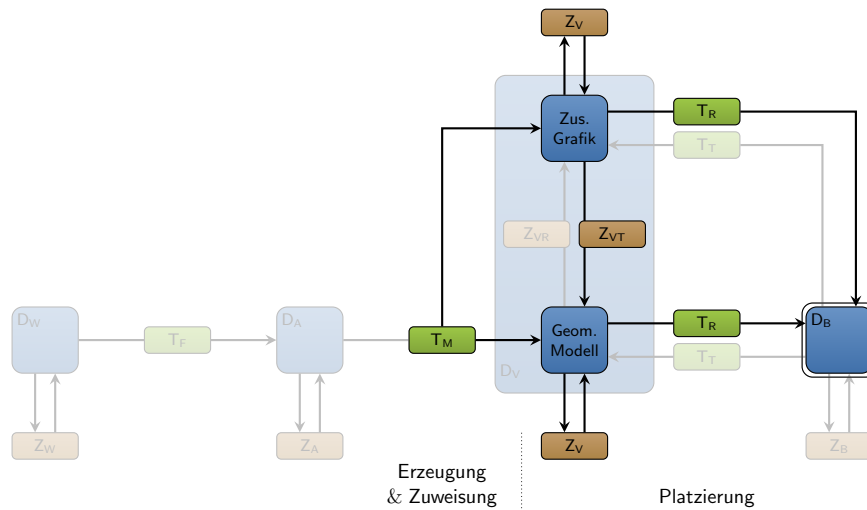


Abbildung 5.10.: Die entwickelten Lösungen im erweiterten Data-State-Referenzmodell. Bei der vorgestellten Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive werden verschiedene Elemente des erweiterten Data-State-Referenzmodells eingebunden. Hierbei können zwei wesentliche Phasen – die Erzeugung / Zuordnung sowie die Platzierung zusätzlicher Grafikprimitive – identifiziert werden.

begrenzt nutzbar, ermöglicht sie die *gleichzeitige* Darstellung von Daten und Unsicherheiten. BOUKHELIFA et al. haben mittlerweile in einer Studie [BBIF12] gezeigt, dass diese Kodierung in weiteren Visualisierungsverfahren ähnlich gut wahrgenommen und interpretiert wird wie Weichzeichnungen oder entsättigte Farben. Der entwickelte Ansatz ist somit eine mögliche Alternative zu bekannten Verfahren der Unsicherheitsvisualisierung.

Auch die entwickelten Beschriftungsverfahren stellen eine leistungsfähige Lösung dar und sind mit beliebigen Methoden der Informationsvisualisierung kombinierbar (vgl. Abb. 5.3, 5.8 und 5.9). Durch Umsetzung der im NPR angestrebten kommunikationsunterstützenden Beschriftung – also die Anreicherung mit zusätzlichen Information *ohne* die Überlagerung von Bildinformationen – kann in den dargestellten Anwendungsbeispielen die Aussagekraft der visuellen Repräsentation erhöht werden. Obwohl entsprechende Verfahren schon länger für die Illustration als auch für die Kartographie existieren, sind die hier vorgestellten Ansätze die Ersten, die diese Berücksichtigung anderer visueller Repräsentanten bei gleichzeitiger Beachtung der hohen Interaktionsanforderungen im Umfeld der Informationsvisualisierung ermöglichen. Besonders die überlagerungsfreie globale Beschriftung ist zwischenzeitlich umfassend zitiert und an spezielle Bedürfnisse angepasst genutzt worden (siehe [Mun09b, Che10, LSST11, SHS11b, LZP⁺12, TBK⁺12, PPBT12]).

Das Bereitstellen zusätzlicher Informationen unterstützt die Interpretation der Daten und kann hierdurch die Aussagekraft der Visualisierung erhöhen. Da die entwickelten Ansätze zur Nutzung zusätzlicher Grafikprimitive auf diese Weise die Kommunikation von Informationen fördern, sind sie der illustrativen Informationsvisualisierung zuzuordnen.

Zusätzliche Grafikprimitive stellen zahlreiche Parameter bereit, um deren Erscheinungsbild zu beeinflussen und auf diese Weise Informationen zu kommunizieren. Auch hier gibt die konkrete Anwendung innerhalb der Informationsvisualisierung die Grenzen einer möglichen Nutzung dieser Parameter vor. So sind etwa viele der mit *Strokes* erzielbaren visuellen Effekte nur dann sichtbar, wenn die *Strokes* eine gewisse Breite aufweisen. Gerade bei der Visualisierung großer Datenmengen, können derartige dickere *Strokes* schnell das *Visual Clutter* vergrößern und so die Effektivität wenn nicht sogar die Expressivität verletzen. Die betrachteten Anwendungen und auch andere Ansätze zur *Stroke*-Nutzung – wie beispielsweise die *Stroke*-Erzeugung aus Bilddaten in einer im Rahmen dieser Dissertation betreuten Studienarbeit [Vir08] oder andere *Stroke*-basierte Ansätze [Hea01, HTER04, THE07] – zeigen aber, dass sinnvolle Parametrisierungen möglich sind.

Auch Beschriftungen lassen sich vielfältig parametrisieren. Da aber die Überlagerungsfreiheit eine wesentliche Voraussetzung zur Interpretation von Parametervariationen ist, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Schwerpunkt hierauf gelegt. Untersuchungen zur Parametrisierbarkeit platzierter Beschriftungen wurden ansatzweise bereits im Vorlauf dieser Dissertation betrachtet (vgl. [Lub05]). Die Schriftparametrisierung stellt dennoch ein interessantes Thema zukünftiger Arbeiten dar.

6. Modellmanipulationen auf der Ebene der visuellen Abstraktion

Im Mittelpunkt dieses Kapitels steht die Nutzung neuer Modellmanipulationsverfahren auf der Ebenen der visuellen Abstraktion für die illustrative Informationsvisualisierung. Zunächst werden hierfür zwei grundlegende Ansätze – die Nutzung von Phantomzeichnungen und Explosionszeichnungen – in einem einleitenden Überblick bezogen auf die Informationsvisualisierung betrachtet (Kap. 6.1). Für jedes Verfahren folgt eine ausführliche Diskussion der jeweils adressierten Problemstellung, der entwickelten Lösung und der hiermit erzielten Ergebnisse (Kap. 6.2 und 6.3). Beide Ansätze wurden in den Publikationen *Discovering the Covered: Ghost-Views in Information Visualization* und *Explode to Explain – Illustrative Information Visualization* veröffentlicht, wovon die letztere in Teil II dieser Dissertation wiedergegeben ist. In Kapitel 6.4 werden die entworfenen Modellmanipulationen in das erweiterte Data-State-Referenzmodell eingeordnet und zusammengefasst.

6.1. Überblick

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen, wie Modellmanipulation aus dem Bereich der freilegenden Darstellungen genutzt werden können, um auf der Ebene der visuellen Abstraktion zusätzliche Informationen zu kommunizieren:

- Als erster Ansatz zur Anwendung von Modellmanipulation werden in Abschnitt 6.2 Phantomzeichnungen eingeführt. Sie dienen im Rahmen dieser Arbeit zur *Auflösung von Überlagerungen* und können in verschiedenen Visualisierungsverfahren angewendet werden [LS08a].
- Das in Abschnitt 6.3 vorgestellte Modellmanipulationsverfahren verwendet Explosionszeichnungen unter zwei Gesichtspunkten. Zum Einen unterstützt der entwickelte Ansatz die *Kommunikation der Funktionsweise* konkreter Visualisierungsverfahren und zum Anderen dienen die Explosionszeichnungen der *Freilegung relevanter Informationen*. Letzter Aspekt gleicht einer Hervorhebung dieser Informationen und unterstützt so etwa deren Lokalisation. Beide Möglichkeiten werden an verschiedenen Verfahren zur Visualisierung von Hierarchien und multivariaten Datensätzen demonstriert (vgl. [LS07b]). Eine Erweiterung dieses Ansatzes befasst sich mit der zeitlichen Zerlegung (vgl. [RLTS08]).

6.2. Phantomzeichnungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde bereits mehrfach gezeigt, dass die Überlagerung visueller Repräsentanten die Effektivität und sogar die Expressivität einer visuellen Repräsentation verletzen können. Die aus der Illustration stammenden *Phantomzeichnungen* stellen eine wichtige Option aus dem Bereich der Modellmanipulationen dar, diesem Problem zu begegnen. Die nachfolgenden Abschnitte zeigen die wesentlichen Schritte, mit denen das entwickelte Verfahren die Nutzung von Phantomzeichnungen in konkreten dreidimensionalen Visualisierungsverfahren ermöglicht (vgl. [LS08a]). Die Ergebnisse werden an konkreten Beispielen diskutiert.

6.2.1. Problemstellung

Das *Overplotting*, also die gegenseitige Überlagerung visueller Repräsentanten, ist ein grundsätzliches Problem dreidimensionaler Visualisierungen (siehe [CMS99, S.61]). Neben der verzerrten Wahrnehmung von Distanzen, ist die mögliche Überlagerung wichtiger Informationen ein wesentlicher Grund für immer wieder geführte Diskussionen und Untersuchungen über die Eignung dreidimensionaler Visualisierungsverfahren (vgl. etwa [TKAM06, OA10]).

Von den von ELLIS und DIX [ED07] und FEW [Few08] zusammengefassten Lösungsansätzen für Überlagerungen eignen sich einige Methoden auch für eine Anwendung in dreidimensionalen Visualisierungsverfahren. Eine einfache und weit verbreitete Möglichkeit besteht in der Nutzung von Transparenzen. Diese führen bei einer globalen Anwendung – also gleichmäßiger Transparenz aller visuellen Repräsentanten – jedoch dazu, dass mehr Informationen ausgeblendet werden, als für die Freilegung der relevanten Informationen notwendig ist (vgl. [Few08]). Zudem werden durch Transparenzen in der Regel die Farben der sich überlagernden visuellen Repräsentanten modifiziert, was zur Verletzung der Expressivität führen kann, wenn Farbe als visuelle Variable genutzt wird.

6.2.2. Lösungsansatz

Phantomzeichnungen sind ein Modellmanipulationsverfahren zur illustratorischen Freilegung relevanter Informationen. Ziel dieser Darstellungen ist es, die Sichtbarkeit relevanter Modellbestandteile zu gewährleisten, ohne deren Position zu beeinflussen. Die ursprüngliche Überlagerung soll dabei trotzdem kommuniziert werden. Um dies zu erreichen, wird *nur* die Sichtbarkeit verdeckender Modellbestandteile angepasst und nur wenige Informationen über diese Bestandteile dargestellt (z.B. Halbtransparenz, Phantomlinien). So gelingt es, die relevanten Objekte sichtbar zu machen und gleichzeitig einen Großteil der Kontextinformationen zu erhalten. Auf diese Weise unterstützen Phantomzeichnungen die Lokalisation der relevanten Objekte und durch den umfassenden Erhalt der Kontextinformationen auch deren Einordnung und Interpretation. In dieser Weise werden Phantomzeichnungen bereits in der illustrativen Volumenvisualisierung genutzt (vgl. [VG05, BGKG05, BG07b, RBG08]).

In Anlehnung an diese Nutzung in der Illustration, bieten sich Phantomzeichnungen auch in der Informationsvisualisierung an. Gerade die inbegriffene lokale Sichtbarkeitsanpassung reduziert den Anteil, zum Zweck der Freilegung modifizierter visueller Repräsentanten. Da sich verschiedene Möglichkeiten bieten, die verdeckenden visuellen Repräsentanten darzustellen, sind Phantomzeichnungen auch dann nutzbar, wenn die visuelle Variable *Farbe* die Daten kodiert. Diese Eigenschaften motivieren den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansatz zur Nutzung von Phantomzeichnungen in dreidimensionalen Visualisierungsverfahren.

6.2.3. Umsetzung und Diskussion

Das Grundprinzip der Phantomzeichnungen besteht darin, nur diejenigen visuellen Repräsentanten zu modifizieren, die *relevante* Informationen überlagern. Um eine entsprechende Unterscheidung anzupassender und nicht anzupassender visueller Repräsentanten vornehmen zu können, wird das geometrische Modell während des *Mappings* zunächst mit der Relevanz der assoziierten Daten attribuiert. Auf Basis dieser Informationen erfolgt nun prinzipiell eine Manipulation des geometrischen Modells, wobei nur die Sichtbarkeit der verdeckenden weniger relevanten Repräsentanten angepasst wird. Der wesentliche Bestandteil des neuen Verfahrens ist eine so genannte *Importance Map*.

6.2.3.1. Sichtbarkeitsanpassung mittels Importance Map

Die Bereiche in denen Überlagerungen auftreten sind in der Regel stark vom Blickwinkel und Bildausschnitt abhängig. Um deren genaue aufwendige Bestimmung im geometrischen Modell zu vermeiden, werden die Sichtbarkeitsanpassungen des geometrischen Modells erst während dessen Überführung in die Bildebene mittels *Rendering*-Operatoren umgesetzt. Zu diesem Zweck, wird ein spezieller *G-Buffer* – die so genannte *Importance Map* – eingeführt. Diese kodiert pro Pixel die maximale Relevanz dort dargestellter visueller Repräsentanten und wird mittels einer entsprechenden Maximumprojektion aus den zugeordneten Relevanzwerten erzeugt.

Während des *Renderings* erlaubt die *Importance Map* nun einen zusätzlichen pixelgenauen Vergleich: Ist die Relevanz eines aktuell rasterisierten visuellen Repräsentanten an der entsprechenden Pixelposition geringer als in der *Importance Map* verzeichnet, so wird die Sichtbarkeit dieses Repräsentanten an dieser Position entsprechend modifiziert (vgl. Abb. 6.1). Um den Tiefeneindruck der visuellen Repräsentation für eine korrekte Interpretation zu erhalten, werden die verdeckenden visuellen Repräsentanten in den Überlagerungsbereichen aber weiterhin dargestellt. Hierfür werden sie (1) entweder nur durch Phantomlinien (z.B. Konturen) oder (2) halbtransparent dargestellt. Transparenzen können nur dann verwendet werden, wenn die damit erzeugten Mischfarben die Interpretation der Daten nicht beeinflussen. Phantomlinien eignen sich hingegen auch für den Fall, dass die Farben Daten kodieren. Sie lassen sich etwa aus dem *Normalen-Buffer* extrahieren (vgl. [Goo98]).

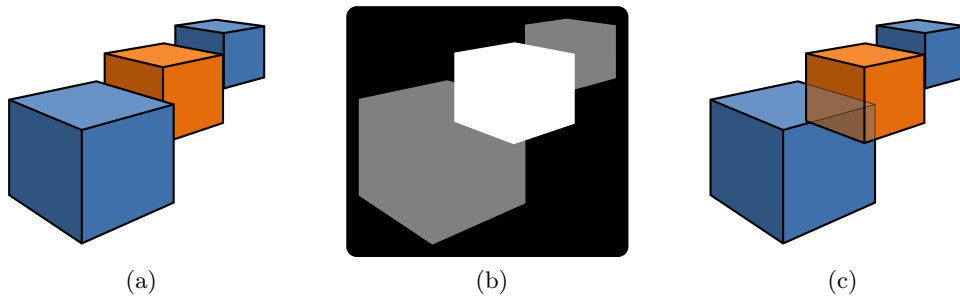


Abbildung 6.1.: Freilegung mittels *Importance Map*. Von den abgebildeten Boxen repräsentiert die orange Box die freizulegenden relevanten Informationen (a). Für deren Freilegung wird aus der Relevanz der Boxen die *Importance Map* erzeugt (b). Sie wird von *Rendering*-Operatoren dafür genutzt, um lokal die Sichtbarkeit überlagernder weniger relevanter Objekte anzupassen (c).

6.2.3.2. Ergebnisse

In Abbildung 6.2 werden drei Anwendungsbeispiele für Phantomzeichnungen gezeigt. Zur Verdeutlichung der durch Phantomzeichnungen erzielten Effekte werden die verschiedenen Visualisierungen jeweils auch einmal ohne sichtbarkeitsfördernde Maßnahmen (z.B. Verzerrungen, vgl. Kap. 2.1.4) dargestellt.

- ▷ **StepTree** Die Abbildungen 6.2(a) und (b) zeigen einen biologischen Abstammungsbaum [FP03] mittels eines *StepTrees* [BCS04]. Vier Teilbäume wurden als relevant markiert und sind in 6.2(a) teilweise überlagert. Im dargestellten Bildausschnitt ist dadurch nicht in jedem Fall zu erkennen, dass die Wurzelknoten der Teilbäume auf verschiedenen Hierarchieebenen liegen. Dies kann in diesem Fall nur durch eine interaktive Anpassung des Bildausschnitts herausgefunden werden. In 6.2(b) werden die beschriebenen Phantomzeichnungen in Kombination mit Halbtransparenzen verwendet. Hierdurch wird die Sichtbarkeit der ausgewählten Informationen gewährleistet und die angesprochene Einordnung der Teilbäume ist jederzeit blickpunktunabhängig möglich.
- ▷ **TreeCube** Bei der *TreeCube*-Visualisierung [TON03] des gleichen Datensatzes verschärft sich das Überlagerungsproblem noch weiter. Von drei relevanten Teilbäumen sind in Abbildung 6.2(c) lediglich zwei Teilbäume teilweise sichtbar. Selbst Interaktionen zur Anpassung der Ansicht (z.B. Rotation, Vergrößerung) helfen in diesem Fall nicht, den innen gelegenen Teilbaum sichtbar zu machen. Erfolgt die Markierung der Teilbäume nicht durch interaktive Selektion sondern mittels Automatismen, so besteht hier die Möglichkeit einer Fehlinterpretation der visuellen Repräsentation. Durch Nutzung der Phantomzeichnungen und Halbtransparenzen erfolgt in 6.2(d) eine lokale Anpassung der verdeckenden visuellen Repräsentanten. Alle Teilbäume sind nun vollständig und ebenfalls unabhängig vom Blickpunkt sichtbar.

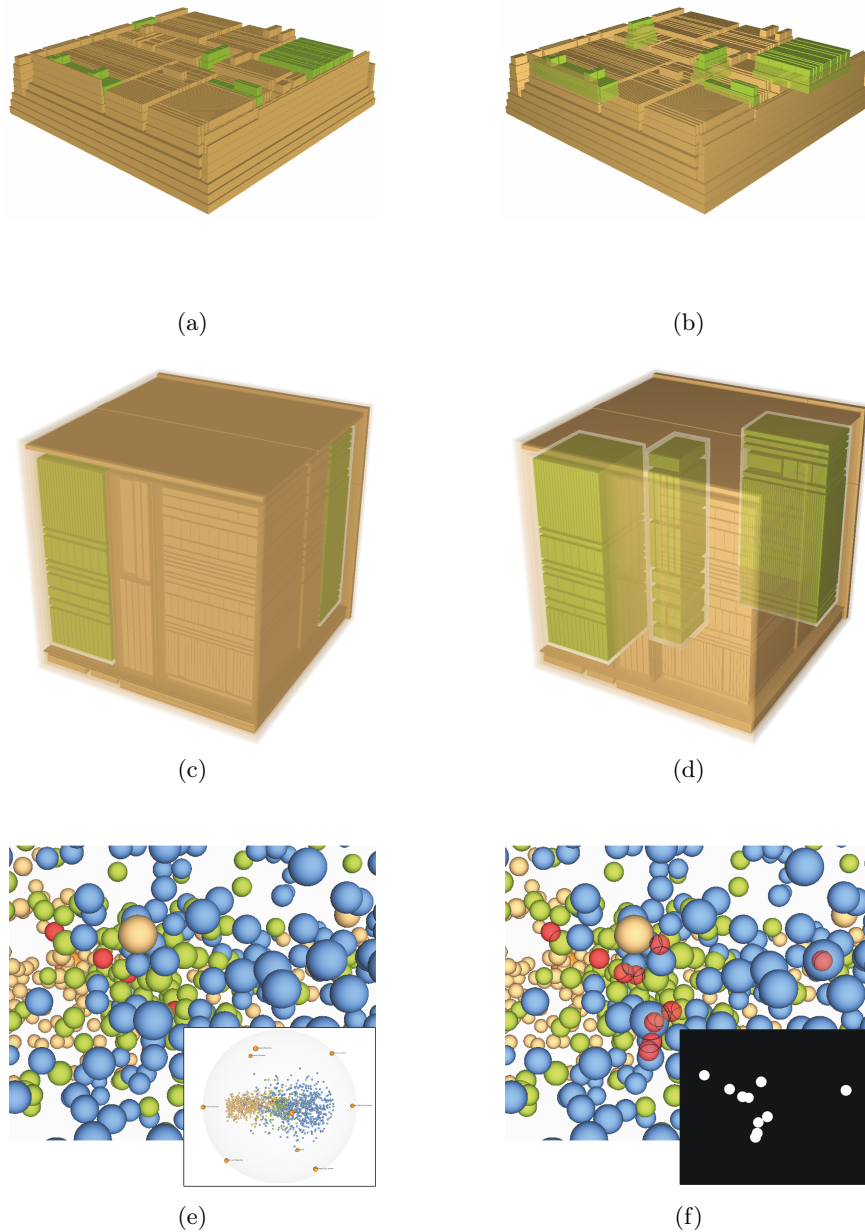


Abbildung 6.2.: Phantomzeichnungen in verschiedenen dreidimensionalen Visualisierungsverfahren. Durch die lokale Sichtbarkeitsanpassung verdeckender visuelle Repräsentanten kann die Sichtbarkeit der relevanten Informationen (in (a)–(d) grün, in (e), (f) rot) für beliebige Blickpunkte gewährleistet werden. Ein Beispiel einer genutzten *Importance Map* ist in (f) dargestellt.

- ▷ *Federkraftbasierte Visualisierung* Die Abbildungen 6.2(e) und (f) zeigen einen vergrößerten Ausschnitt der gesamten Gesundheitsdaten innerhalb einer federkraftbasierten dreidimensionalen Visualisierung (vgl. [TK98]). Durch die hohe Anzahl visueller Repräsentanten und die dreidimensionale Darstellung kommt es zu umfassenden Überlagerungen, die unter anderem die Lokalisation relevanter Daten erschweren. In diesem Beispiel wurden die visuellen Repräsentanten eines einzelnen Landkreises zu verschiedenen Zeitpunkten selektiert, die in 6.2(e) jedoch nur teilweise sichtbar sind. Für eine sequentielle Betrachtung aller selektierten visuellen Repräsentanten sind umfassende Blickpunktanpassungen notwendig. Mit der Anwendung der Phantomzeichnung in (f) werden hingegen alle visuellen Repräsentanten sofort und blickpunktunabhängig sichtbar. Gleichzeitig lassen sich die betrachteten Daten in die gesamte Datenmenge einordnen, da die Sichtbarkeitsanpassung nur lokal vorgenommen werden und die Kontextinformationen umfassend erhalten bleiben.

In den drei betrachteten Beispielen werden Farben jeweils nur für eine kategorische Unterscheidung der visuellen Repräsentanten genutzt und so können jeweils Halbtransparenzen eingesetzt werden. In Abbildung 6.2(f) werden zusätzlich die Konturen der überlagernden visuellen Repräsentanten dargestellt. Unabhängig hiervon gelingt es in jedem der obigen Anwendungsbeispiele, die relevanten Informationen im Fall einer Überlagerung durch Phantomzeichnungen unabhängig vom Blickpunkt sichtbar zu machen. Da trotz Sichtbarkeitsanpassungen jeweils ein Teil der überlagernden visuellen Repräsentanten erhalten bleibt (Transparenz, Phantomlinien), wird die Tiefenwahrnehmung kaum beeinflusst. Auf diese Weise unterstützen Phantomzeichnungen die Lokalisation der relevanten Informationen und ermöglichen weiterhin deren Einordnung im Kontext.

Die obigen Beispiele demonstrieren aber auch, dass die entwickelte Anwendung der Phantomzeichnungen unabhängig vom verwendeten Visualisierungsverfahren ist. Dies ergibt sich aus der Nutzung der *Importance Maps*, welche sich durch eine Modifikation der *Rendering*-Operatoren für beliebige Visualisierungsverfahren erzeugen lassen.

6.2.3.3. Erweiterung

Das beschriebene Vorgehen wurde für dreidimensionale Visualisierungsverfahren entwickelt und in dieser Form publiziert. Die wesentlichen Eigenschaften der Phantomzeichnungen – nämlich die lokale Sichtbarkeitsanpassung kann auch in zweidimensionalen Techniken umgesetzt werden. Für diesen Zweck ist der entwickelte *Importance Map*-Ansatz ebenso nutzbar.

Die Abbildung 6.3 zeigt ein Beispiel. In der *Scatterplot*-Darstellung des Klimadaten-satzes kommt es zu Überlagerungen visueller Repräsentanten (a). Zu Freilegung des selektierten grünen Clusters genügt es, nur überlagernde rote und blaue Punkte in ihrer Sichtbarkeit anzupassen. Es werden jeweils nur die Konturen dieser überlagernden Punkte dargestellt und das grüne Cluster wird ohne eine etwaige Modifikation der *Rendering*-Reihenfolge sichtbar (b).

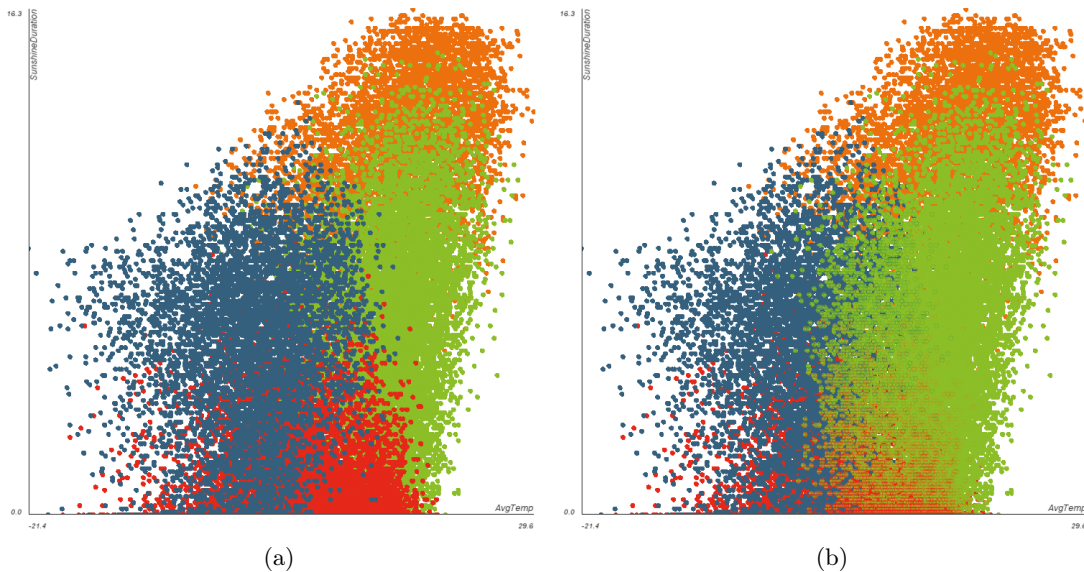


Abbildung 6.3.: Phantomzeichnungen in zweidimensionalen Visualisierungsverfahren. In einem zweidimensionalen *Scatterplot* (a) wird die Sichtbarkeit des grünen Clusters durch lokale angewendete Konturzeichnungen gewährleistet (b).

6.3. Explosionszeichnungen

Explosionszeichnungen sind eine weitere Illustrationstechnik, um relevante Objekte in ihrem Kontext sichtbar zu machen. Darüber hinaus schaffen diese Zeichnungen Platz zwischen den Modellbestandteilen. In den nachfolgenden Abschnitten wird gezeigt, wie sich diese Eigenschaften in einer illustrativen Informationsvisualisierung nutzen lassen (vgl. [LS07b]). Auch hier wird der Nutzen dieser Modellmanipulationen an konkreten Visualisierungsverfahren demonstriert.

6.3.1. Problemstellung

Viele Visualisierungsverfahren sind durch einen kompakten Aufbau gekennzeichnet, um beim Umgang mit großen Datenmengen die Darstellungsfläche möglichst gut auszunutzen. Die Nutzung von *space-filling* Ansätzen ist eine hierbei nicht selten gewählte Herangehensweise. Durch die kompakte Darstellung ist es bei diesen – aber auch in anderen Verfahren – oft schwer, einzelne visuelle Repräsentanten zu lokalisieren und bei Bedarf mit zusätzlichen Detailangaben oder Beschriftungen anzureichern.

Neben diesem technischen Problem, entstehen aber auch Probleme für den Nutzer. So ist es durchaus möglich, dass er die kompakte Visualisierungstechnik als solche nicht versteht oder dass die Parametrisierung der Technik nicht klar ist. Außerdem kann er

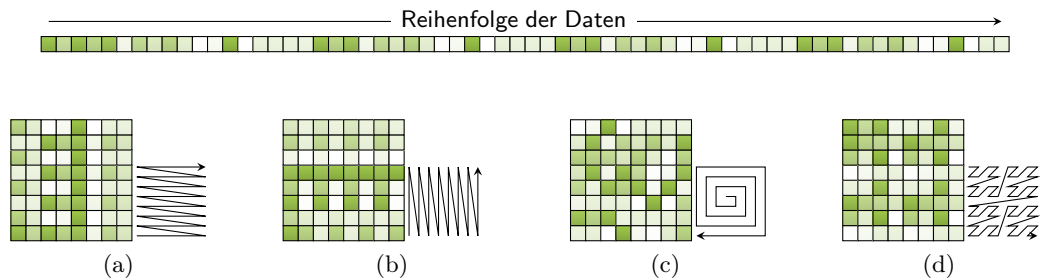


Abbildung 6.4.: Nicht erkennbare Pixelanordnung. Die Anordnung der Daten in einer raumfüllenden pixelbasierten Visualisierung ist alleine aus der visuellen Repräsentation oft nicht zu entnehmen – für die Deutung auftretender Muster aber von Bedeutung. So können periodisch auftretende Werte (durchgehende Zeilen / Spalten in (a), (b), (d)) bei Verwechslung der Anordnungen etwa als Sequenz gleicher Werte interpretiert werden.

eventuell einzelne Datenwerte nicht ohne Weiteres extrahieren, was zu Fehlinterpretationen führen kann. Exemplarisch soll hier etwa die Anordnung der Daten in pixelbasierten Visualisierungen genannt werden, die aus der visuellen Repräsentation in der Regel schwer zu ersehen ist (vgl. Abb. 6.4), für die Extraktion von Daten jedoch wichtig ist.

6.3.2. Lösungsansatz

Explosionszeichnungen werden in der Illustration dafür genutzt, um sonst beieinander liegende Modellbestandteile komplexer geometrischer Modelle räumlich voneinander zu trennen. Mit dieser räumlichen Trennung lassen sich verschiedene illustrative Ziele verfolgen. Dazu gehören etwa das Freilegen einzelner sonst überlagerter Modellbestandteile, die separierte Darstellung aller Modellbestandteile, aber auch die Kommunikation zusätzlicher Informationen wie etwa des Modellaufbaus, der Funktionsweise oder der Objektbezeichner – beispielsweise durch die Explosionsreihenfolge, Beschriftungen, Linien und Pfeile. Auf diese Weise unterstützen Explosionszeichnungen nicht nur die Lokalisation einzelner Modellbestandteile sondern auf unterschiedliche Weise auch deren (semantische) Einordnung in das Modell.

Damit können Explosionszeichnungen einen Lösungsansatz für die einleitend beschriebenen Probleme darstellen. Beispielsweise können sie nachvollziehbar einen freien Raum im Umfeld einzelner visueller Repräsentanten erzeugen. Damit werden diese Repräsentanten zunächst sichtbar und der zusätzliche Raum kann zudem auch für Annotationen genutzt werden. Deshalb wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation dieser Ansatz an pixelbasierten Visualisierungen, verschiedenen Hierarchievisualisierungen sowie dem *ThemeRiver* [HHN00] untersucht.

6.3.3. Umsetzung und Diskussion

Wegen der großen Datenmengen ist eine Zerlegung der gesamten visuellen Repräsentation in der Regel nur schwer machbar und so beschränkt sich das entwickelte Modellmanipulationsverfahren auf die Freilegung einzelner visueller Repräsentanten. Die Erzeugung von Explosionszeichnungen basiert auf folgendem Schema.

6.3.3.1. Prinzipielles Vorgehen

Die Definition einer allgemeingültigen Zerlegungsmethode ist aufgrund der großen Vielfalt existierender Techniken nicht ohne weiteres möglich. Dennoch können die grundlegenden Schritte zur Erzeugung von Explosionszeichnungen wie folgt identifiziert werden:

1. Den Ausgangspunkt der Zerlegung bildet eine Teilmenge relevanter visueller Repräsentanten. Diese sollen durch Nutzung der Explosionszeichnungen freigelegt – dies bedeutet im Folgenden nicht nur die Aufhebung von Überlagerungen sondern die allgemeine räumliche Trennung vom Kontext – und mit zusätzlichen Details versehen werden.
2. Es folgt die Spezifikation der Zerlegungsparameter (z.B. Explosionsreihenfolge, Explosionsrichtung, Gruppierung von visuellen Repräsentanten). Damit wird festgelegt, wie die in Schritt 1 festgelegten visuellen Repräsentanten räumlich von ihrem Kontext getrennt werden.
3. Es schließt sich die Ausführung der eigentlichen Zerlegung an, bei der nun sichtbar die Positionen der visuellen Repräsentation modifiziert werden. Diese Zerlegung erfolgt mittels einer Animation, um die Explosion nachvollziehbar und mental umkehrbar zu gestalten.
4. Die räumliche Zerlegung erzeugt Freiraum im Umfeld der freigelegten relevanten visuellen Repräsentanten. Dieser wird für das Einfügen zusätzlicher Detailinformationen (z.B. Beschriftungen, Pfeile, Vergrößerungen) genutzt.

Explosionszeichnungen stellen im Wesentlichen eine Modellmanipulation im Zustand der visuellen Abstraktion dar. Dabei werden die Positionen der hier vorliegenden visuellen Repräsentanten modifiziert. Die Festlegung, welche visuellen Repräsentanten in welcher Reihenfolge zu verschieben sind (Schritt 1 und 2) und welche zusätzlichen Informationen einzubringen sind (Schritt 4), beansprucht aber zusätzlich auch die *Mapping*-Operatoren.

Aufgrund der Vielfalt der Visualisierungsmethoden, die alle unterschiedliche *Mapping*-Strategien einsetzen, muss für jedes einzelne Verfahren geprüft werden, ob und wie sich Explosionszeichnungen anwenden lassen. Die folgenden Beispiele stellen konkrete Umsetzungen des beschriebenen Vorgehens dar und verdeutlichen, wie Explosionszeichnungen die Identifikation von Dateneigenschaften, die Lokalisation einzelner Daten und das Bereitstellen zusätzlicher Informationen unterstützen.

6.3.3.2. Ergebnisse

Die Abbildungen 6.5–6.7 zeigen die Nutzung von Explosionszeichnungen in verschiedenen Verfahren der Informationsvisualisierung. Da die eigentliche Zerlegung als nachvollziehbare Animation abläuft, sind jeweils verschiedene Zeitpunkte dieser Animation dargestellt. Nachfolgend wird auf die jeweils adressierten konkreten Problemstellungen, die Umsetzung des obigen Verfahrens, sowie die damit erreichten Ergebnisse eingegangen.

- ▷ *ThemeRiver* Abbildung 6.5 zeigt zunächst ein einführendes Beispiel an einem *ThemeRiver* (siehe [HHN00]). Diese Visualisierung dient der gleichzeitigen Darstellung mehrerer Datenverläufe. Im abgebildeten Beispiel sind die Verläufe verschiedener trigonometrischer und parabolischer Funktionen dargestellt. Durch *Days Sinuswellentäuschung* [DS91] und die auftretende Verzerrung der einzelnen Verläufe ist es mitunter schwer, den exakten Verlauf zu erkennen und etwa Bereiche konstanter Häufigkeit oder Maximalwerte zu lokalisieren (Abb. 6.5(a)).

Die folgend beschriebene Explosionszeichnung ermöglicht eine detailliertere Darstellung einzelner Verläufe:

1. Als erstes wird ein relevanter freizulegender visueller Repräsentant festgelegt. Hier ist dies beispielhaft der grün dargestellte Datenverlauf, der genauer analysiert werden soll.
2. In diesem Anwendungsbeispiel besteht das Ziel der Explosionszeichnung darin, Platz für eine verzerrungsfreie detailliertere Darstellung des relevanten Verlaufs zu schaffen. Die im zweiten Schritt spezifizierte Zerlegung löst deshalb den relevanten Verlauf aus dem *ThemeRiver* heraus, indem die Abstände zwischen relevantem und weniger relevanten Verläufen vergrößert werden (Abb. 6.5(b)). Diese Verschiebung ist groß genug, dass eine verzerrungsfreie Darstellung und Beschriftungen Platz finden. Diese Freistellung wirkt außerdem hervorhebend.
3. Die Zerlegung erfolgt mittels einer nachvollziehbaren Animation (Abb. 6.5(b)–(e)). Auf diese Weise wird der Zusammenhang zwischen der Zerlegung und der ursprünglichen Darstellung deutlich.
4. Um die Analyse des freigestellten Verlaufs zu unterstützen, werden die Verzerrungen mittels einer Animation aus dem relevanten Verlauf entfernt. Zusätzlich eingeblendete Achsen und Beschriftungen unterstützen ebenfalls die Analyse des freigelegten Verlaufs (Abb. 6.5(e)).

Durch das platzschaffende Freilegen und die Beschriftung im Freiraum, wird der relevante Verlauf hervorgehoben und mit zusätzlichen Details angereichert. Die Überführung in eine verzerrungsfreie Darstellung verhindert die Sinuswellentäuschung und erleichtert die Analyse des Verlaufs. Erst dadurch wird das symmetrische Muster des Datenverlaufs deutlich.

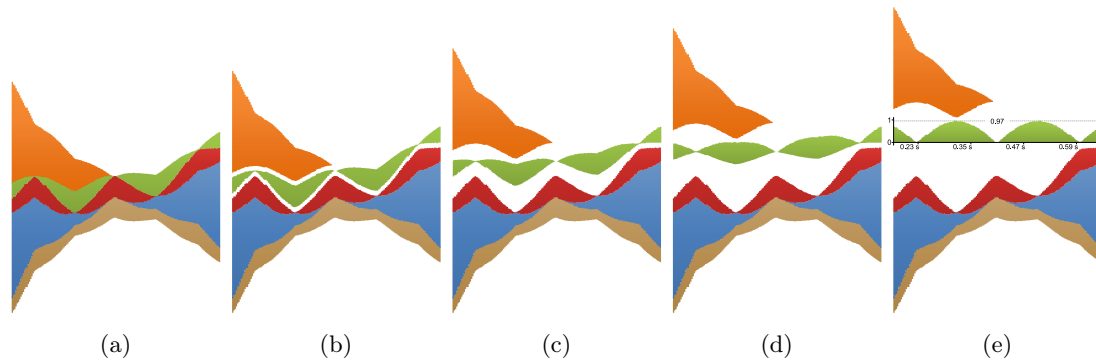


Abbildung 6.5.: Explosionszeichnung eines *ThemeRivers*. Verschiedene trigonometrische und parabolische Funktionen sind in einem *ThemeRiver* visualisiert. Durch die auftretenden Verzerrungen sind die einzelnen Verläufe relativ schwer zu interpretieren (a). Mit der Explosionszeichnung wird ein zu analysierender Verlauf aus der Visualisierung herausgelöst und verzerrungsfrei dargestellt (b)–(e). Zusätzlich eingebrachte Details (Achsen, Beschriftungen) unterstützen ebenfalls die Analyse dieses Verlaufs (e).

▷ **TreeMap** Abbildung 6.6 demonstriert die Anwendung von Explosionszeichnungen an *TreeMaps* (siehe [Shn92]). In diesen ist es mitunter schwer, bestimmte Knoten oder Teilbäume zu lokalisieren und die Struktur der Hierarchie oder die Schachtelungstiefe zu entnehmen. Die Vielzahl verschiedener Layout-Algorithmen (vgl. [SHS11a]) kann das Verständnis der *TreeMap* und so dessen Interpretation beeinträchtigen.

Die folgende Explosionszeichnung hebt einzelne Knoten oder Teilbäume hervor und unterstützt durch zusätzlich eingebrachte Details die Kommunikation der zu Grunde liegenden Daten wie auch der genutzten Layout-Verfahren.

1. In diesem Beispiel wird ein Teil des phylogenetischen Datensatzes [FP03] mit einer *TreeMap* visualisiert (Abb. 6.6(a)). Die freizulegenden visuellen Repräsentanten sind interaktiv selektierte Teilbäume. Die Anwendung automatischer Verfahren zur Selektion ist ebenfalls möglich.
2. Das Ziel dieser Explosionszeichnung besteht darin, diese visuellen Repräsentanten hervorzuheben und gleichzeitig mit Details anzureichern, die nicht nur zusätzliche Informationen sondern auch die zu Grunde liegende Hierarchiestruktur vermitteln. Auf diese Weise wird auch die Funktionsweise des genutzten Layout-Algorithmus' verdeutlicht.

Die relevanten visuellen Repräsentanten sind durch die Schachtelung vollständig von anderen visuellen Repräsentanten eingeschlossen. Deshalb wird die Zerlegung der zweidimensionalen *TreeMap* in die Tiefe vorgenommen. Für die

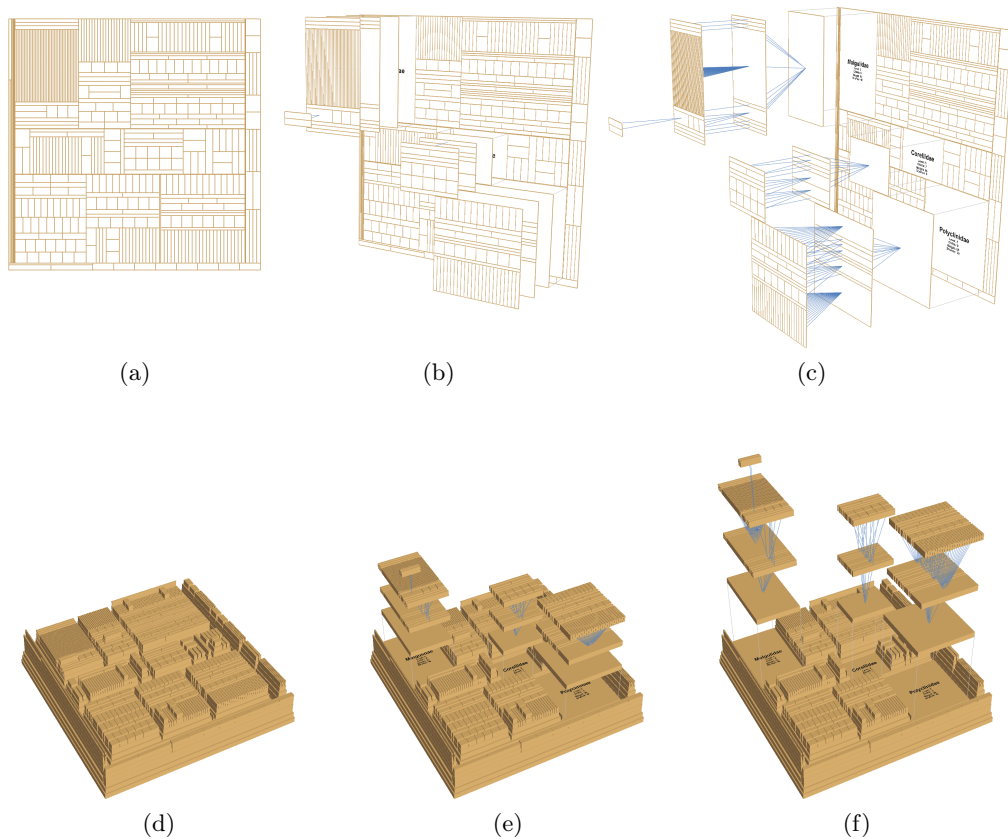


Abbildung 6.6.: Explosionszeichnungen impliziter Hierarchiedarstellungen. Durch die Zerlegung einer *TreeMap* in die Tiefe lassen sich einzelne Knoten bzw. Teilbäume einer visualisierten Hierarchie hervorheben (a)–(c). Diese Zerlegung ist auch in anderen impliziten Verfahren anwendbar (*StepTree* in (d)–(f)). Im erzeugten Freiraum werden zusätzliche Detailinformationen (z.B. Identität, Struktur) dargestellt.

Freilegung der Teilbäume werden diese entlang der Z-Achse verschoben (Abb. 6.6(a)–(c)). Um die Kommunikation der Struktur zu unterstützen, wird allen Knoten des freigelegten Teilbaums entsprechend ihres Hierarchielevels ein entsprechender Tiefenwert zugeordnet.

3. Da der Wechsel von einer zweidimensionalen zu einer dreidimensionalen Visualisierung nicht zwingend nachvollziehbar ist, wird die Explosionszeichnung erst mit einer vom Nutzer angestoßenen Drehung animiert durchgeführt. Auf diese Weise ist die räumliche Zerlegung nachvollziehbar und umkehrbar.
4. Durch die Zerlegung in die Tiefe entsteht Freiraum: Zum einen dort, wo sich die freigelegten visuellen Repräsentanten vor der Zerlegung befanden und zum anderen zwischen den verschiedenen Tiefenebenen. Dieser Raum wird verwen-

det, um Knoteneigenschaften (hier *Horton-Strahler-Zahl* [HDM98], Knoten-ID, Tiefe...) mittels Beschriftungen darzustellen. Zusätzlich eingebrachte Verbindungslinien verdeutlichen die Struktur und zeigen, wie die gegebenen Daten in der Visualisierung angeordnet und umgesetzt sind (Abb. 6.6(c)).

Mit Hilfe dieser Explosionszeichnung treten die ausgewählten Teilbäume aus der Visualisierung hervor und sind schnell zu lokalisieren. Die Zerlegung entlang der Z-Achse verdeutlicht zudem die Struktur der Teilbäume, insbesondere deren Schachtelungstiefe. Diese wird auch mit den dargestellten Kanten verdeutlicht. Die abwechselnde Ausrichtung der Kanten erlaubt zusätzlich einen Rückschluss auf die Funktionsweise des Layout-Algorithmus' (*Slice-And-Dice*). Außerdem machen sie die Hierarchie *explizit* sichtbar. Auch die Beschriftungen vermitteln zusätzliche Informationen.

Die hier definierte Explosionszeichnung für zweidimensionale *TreeMaps* lässt sich auf die meisten Layout-Algorithmen (z.B. [BHW00, BDL05, Wat05, VWL06]), aber auch auf andere zweidimensionale implizite Hierarchievisualisierungstechniken (z.B. *Sunburst* [SZ00]) und sogar auf einige implizite dreidimensionale Hierarchievisualisierungen (siehe [SHS11a], *StepTree* in Abb. 6.6(d)–(f)) übertragen.

- ▷ **PixelMap** Abschließend werden noch einmal die pixelbasierten Visualisierungstechniken aufgegriffen (Abb. 6.7 und 6.8). Die kompakte Anordnung und geringe Größe der visuellen Repräsentanten erschwert es hier mitunter, bestimmte Pixel oder Pixelgruppen zu lokalisieren und zusätzliche Annotationen einzubringen.

Die nachfolgende Explosionszeichnung demonstriert, wie sich einzelne Pixel aus der visuellen Repräsentation herauslösen und mit zusätzlichen Detailinformationen anreichern lassen. Ein anschließend zusammengefasstes alternatives Vorgehen kommuniziert hingegen die Anordnung der Pixel (vgl. [LS07b]).

1. In diesem Beispiel werden die Potsdamer Durchschnittstemperaturen des letzten Jahrhunderts mit der *Recursive Pattern*-Technik dargestellt (vgl. [Kei96]). Mittels Filtermechanismen werden die fünf wärmsten Tage dieses Jahrhunderts als relevante freizulegende Pixel festgelegt.
2. Um die Lokalisation und Identifikation dieser Pixel zu unterstützen, werden sie aus der *PixelMap* herausgelöst. Dazu wird die *PixelMap* an den Positionen dieser Pixel aufgespalten und auseinander geschoben. Die relevanten Pixel werden im geschaffenen Freiraum platziert und so vom Kontext separiert (Abb. 6.7(b),(c)). Die Verschiebung wird so groß gewählt, dass auch Beschriftungen im geschaffenen Freiraum platziert werden können.
3. Die eigentliche Zerlegung erfolgt erneut mittels einer nachvollziehbaren Animation. Auf diese Weise wird deutlich, von welcher Position die relevanten freigelegten Pixel ursprünglich stammen.

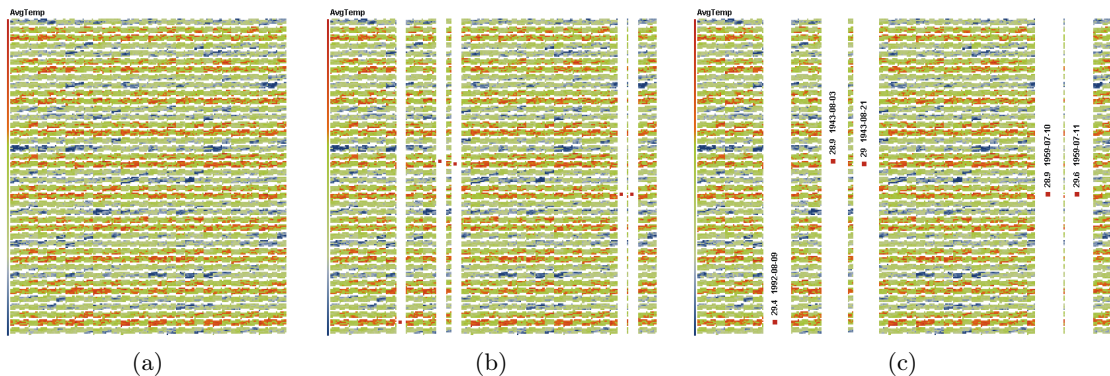


Abbildung 6.7.: Explosionszeichnung einer *PixelMap*. Aus dieser werden die fünf einzelne Pixel herausgelöst und vergrößert (a)–(c). Eingebraachte Beschriftungen kommunizieren die konkreten Werte und Identitäten der Pixel.

4. Die Verschiebung der relevanten Pixel in den geschaffenen Freiraum wirkt hervorhebend. Dieser wird auch genutzt, um die Identitäten und konkreten Werte der freigelegten Pixel über Beschriftungen zu kommunizieren (Abb. 6.7(c)). Zusätzlich werden die freigelegten Pixel leicht vergrößert, um die Wahrnehmung der datenkodierenden Farbe zu unterstützen.

Mit der hier beschriebenen Explosionszeichnung gelingt es, einzelne visuellen Repräsentanten der *PixelMap* hervorzuheben; im Beispiel fünf Pixel. Die zusätzlichen Beschriftungen ermöglichen es, sie zu identifizieren (Datum) und die konkreten Werte zu entnehmen.

Die abschließende Abbildung 6.8 verdeutlicht, wie alternative Explosionszeichnungen mittels der Explosionsreihenfolge die Anordnung der Daten in *PixelMaps* kommunizieren. Für diese Explosionszeichnungen wird im Bildraum halbautomatisch ein Ausschnitt der *PixelMap* festgelegt, der möglichst klein ist, aber gleichzeitig zur Verdeutlichung der Anordnung genügt (vgl. [LS07b]).

Alle hier vorgestellten Explosionszeichnungen manipulieren das geometrische Modell auf der Ebene der visuellen Abstraktion. Dabei werden in erster Linie die Positionen der visuellen Repräsentanten modifiziert. Da die Explosionszeichnungen mehr Platz benötigen, sind in der Regel eine größere Anzahl visueller Repräsentanten von den Verschiebungen betroffen. Diese können sogar den aktuellen Bildschirmbereich verlassen. Aus diesem Grund werden die obigen Explosionszeichnungen nur nach entsprechenden Interaktionen (z.B. Selektion, Drehung) als *Details-on-Demand*-Verfahren genutzt und sind automatisch umkehrbar. Wie bei der Illustration, so muss auch in der Informationsvisualisierung das Design der Explosionszeichnungen sorgfältig entwickelt werden (vgl. Abb. 6.8).

Details zur halbautomatischen Selektion visueller Repräsentanten und zur Kategorisierung der Explosionszeichnungen sind in der Publikation in Teil II auf S. 129 zu finden.

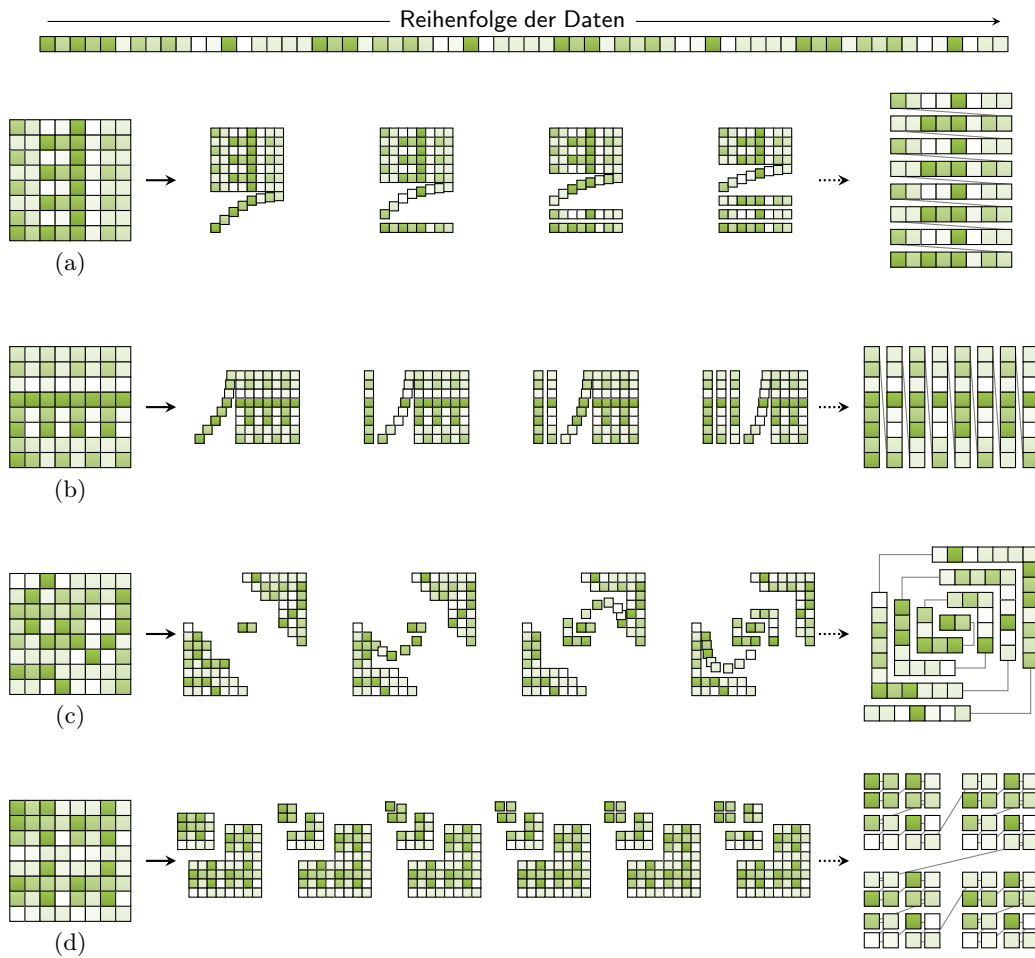


Abbildung 6.8.: Schematische Explosionszeichnungen zur Verdeutlichung verschiedener Anordnungen in *PixelMaps*. Mit der auszugsweise dargestellten Explosionsreihenfolge (mittig), der entsprechenden Animation sowie der finalen Explosionszeichnung (rechts) lässt sich die Anordnung der Daten in einer *PixelMap* kommunizieren. Wenn die visuellen Repräsentanten zusätzlich vergrößert werden, kann die Anordnung auch explizit dargestellt werden (grau, rechts). Die Anordnungen entsprechen denen in Abbildung 6.4: zeilenweise (a), spaltenweise (b), spiralförmig (c) und Z-Kurve (d).

6.3.3.3. Erweiterung: Zeitliche Zerlegung

Um die eingangs diskutierten Problemstellungen zu behandeln, ist neben der räumlichen Zerlegung auch eine zeitliche Zerlegung der visuellen Repräsentation möglich. Diese illustrative Methode ist etwa in Montageanleitungen zu finden, in denen nur die für den jeweiligen Arbeitsschritt notwendigen Materialien und Information dargestellt werden.

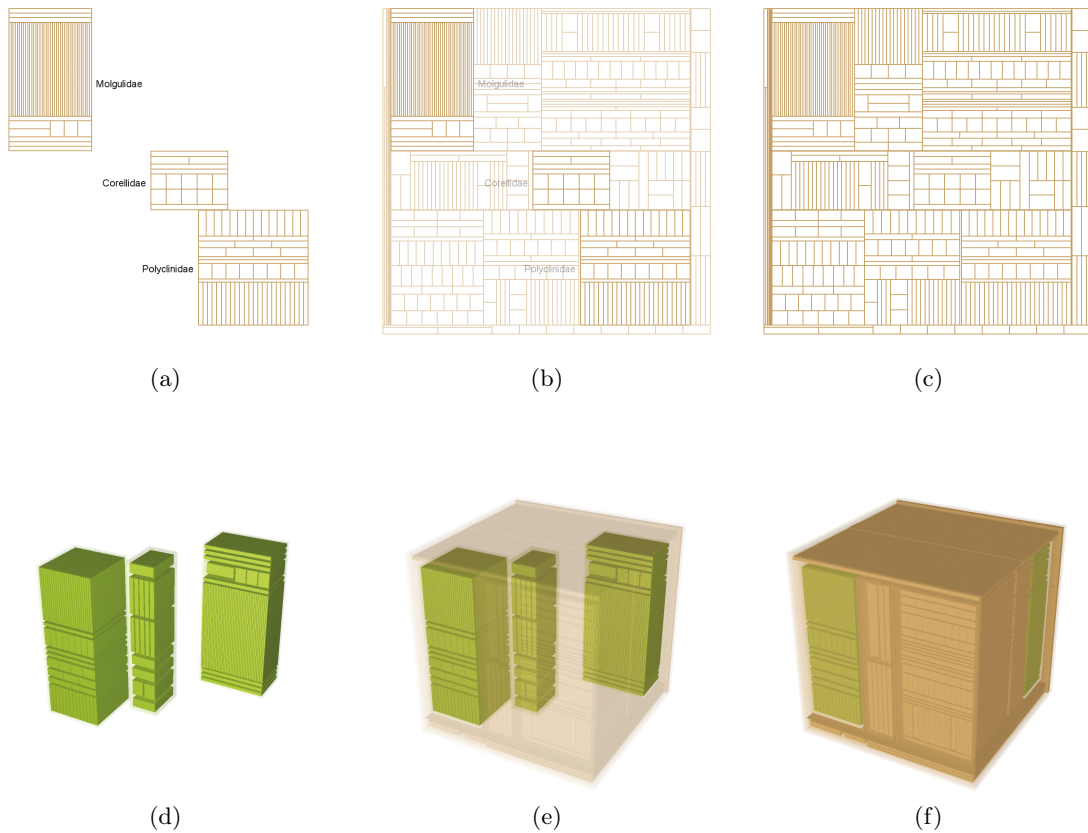


Abbildung 6.9.: Zeitliche Zerlegung der visuellen Repräsentation. Relevante visuelle Repräsentanten werden als erstes dargestellt (a) & (d), worauf nach und nach der Kontext eingeblendet wird ((b)–(c), (e)–(f)). Durch die kurzzeitig separate Darstellung lassen sich zeitweise Beschriftungen anbringen (a) und es werden Überlagerungen aufgelöst (d).

Deshalb wurde auch der Ansatz verfolgt, die visuellen Repräsentanten geordnet nach ihrer Relevanz auszugeben. Abbildung 6.9 zeigt hierzu ein Beispiel. Selektierte Teilbäume des phylogenetischen Datensatzes werden kurzzeitig in einer *TreeMap* und einem *TreeCube* freilegt: Dadurch werden interessierende Informationen kurzzeitig exklusiv dargestellt, was ihre Lokalisation und Interpretation unterstützt. Der kurzzeitig zur Verfügung stehende Platz wird zudem für zusätzliche Beschriftungen genutzt (vgl. Abb. 6.9(a)). Die hier beschriebene zeitliche Zerlegung wurde als *Progressive Information Presentation* publiziert [RLTS08].

6.4. Diskussion

6.4.1. Einordnung in das erweiterte Data-State-Referenzmodell

Die in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren nutzen Modellmanipulationsverfahren im Rahmen einer illustrativen Informationsvisualisierung. Die eigentliche Manipulation geschieht dabei auf der Stufe der visuellen Abstraktion. Weitere Stufen des erweiterten Data-State-Referenzmodells werden jedoch für die Spezifikation der Modellmanipulation und das Bereitstellen zusätzlicher Details benötigt. Die Stufen und Transformationen lassen sich in zwei prinzipielle Phasen unterteilen:

- ▷ **Zuweisung & Parametrisierung** Die vorgestellten Modellmanipulationsansätze beruhen jeweils auf einer echten Teilmenge der visuellen Repräsentanten, die es gilt, in ihrem jeweiligen Kontext freizulegen. Diese Spezifikation beruht auf der Relevanz der repräsentierten Informationen und wird im *Mapping* berücksichtigt. Sie führt zu einer entsprechenden Attributierung des geometrischen Modells. Um die Interpretation dieser ausgewählten visuellen Repräsentanten zu unterstützen, wird im *Mapping* außerdem festgelegt, ob und um welche zusätzlichen Informationen die visuelle Repräsentation anzureichern ist (z.B. Konturen, Linien, Beschriftungen).

Außerdem wird festgelegt, in welcher Form die Modellmanipulationen durchzuführen sind. So werden etwa maximale Transparenzen, Explosionsrichtungen und -reihenfolgen aufgrund der zuvor definierten relevanten Teilmenge visueller Repräsentanten und der genutzten Visualisierungstechnik spezifiziert. Diese Informationen werden durch eine entsprechende Attributierung des geometrischen Modells ebenfalls an die visuellen Repräsentanten gebunden. Auch dies geschieht während des *Mappings*.

- ▷ **Manipulation & Anreicherung** Die Umsetzung der Modellmanipulationen erfolgt (a) entweder direkt im Zustand der visuellen Abstraktion durch entsprechende Zustandsoperatoren Z_V auf dem geometrischen Modell oder auch (b) während des *Renderings* mittels *Rendering*-Operatoren, die programmierbare Hardware ausnutzen. In den entwickelten Ansätzen werden auf diese Weise Positions- und Sichtbarkeitsmodifikationen vorgenommen.

Parallel zu dieser Modellmanipulation werden auch zusätzliche Elemente in die visuelle Repräsentation eingeführt. Dies umfasst beispielsweise zusätzliche Linien oder Achsen die das geometrische Modell anreichern, Konturen die während des *Renderings* erzeugt werden, aber auch Beschriftungen die als zusätzliche Grafikprimitive in die visuelle Repräsentation einfließen. Je nach Art der eingebrachten Informationen werden also weitere Stufen und Operatoren des erweiterten Data-State-Referenzmodells eingebunden.

Die entwickelten Ansätze modifizieren das ursprünglich vom Visualisierungsverfahren bereitgestellte geometrische Modell und führen so zur Einordnung als Modellmanipulation.

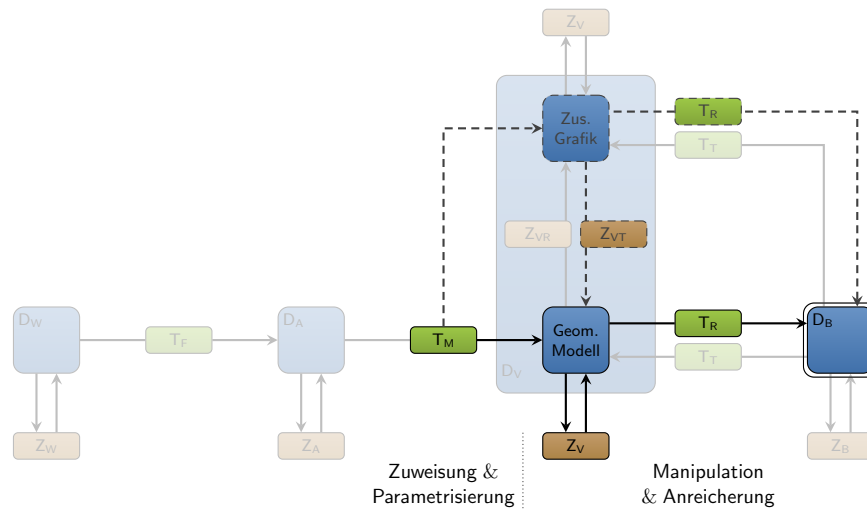


Abbildung 6.10.: Die entwickelten Lösungen im erweiterten Data-State-Referenzmodell. Die Modellmanipulationen beruhen auf verschiedenen Elementen des erweiterten Data-State-Referenzmodells. Beide Verfahren – Phantom- und Explosionszeichnungen – lassen sich in eine Zuweisungs- / Parametrisierungsphase und eine Manipulations- / Anreicherungsphase unterteilen. Elemente des Data-State-Referenzmodells, die *nur* der Anreicherung mit Beschriftungen, Linien, Konturen und Ähnlichem dienen, sind gestrichelt.

nen. Besonders die Spezifikation der zugehörigen Parameter und zusätzlich einzubringen- den Informationen hat jedoch einen umfassenden Einfluss auf die resultierende visuelle Repräsentation bezüglich der Aussagekraft. In Abbildung 6.10 sind die zur direkten Modellmanipulation genutzten Elemente des erweiterten Data-State-Referenzmodells dargestellt. Stufen und Transformationen, die *ausschließlich* der Anreicherung dienen, sind gestrichelt.

6.4.2. Ergebnisse und Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel vorgestellten Modellmanipulationsverfahren ermöglichen es, relevante Informationen in visuellen Repräsentationen freizulegen, um ihre Lokalisation und Interpretation zu unterstützen. Zu diesem Zweck werden Phantomzeichnungen und Explosionszeichnungen eingesetzt, die sich als zusätzliche Alternativen zu bekannten Verfahren der Informationsvisualisierung (z.B. räumliche Verzerrungen, vgl. Kap. 2.1.4) darstellen. So gewährleistet die entwickelte Nutzung von Phantomzeichnung vor allem in dreidimensionalen Visualisierungsverfahren blickpunktunabhängig die Sichtbarkeit bestimmter visueller Repräsentanten. Die Eigenschaft, nur lokal die Sichtbarkeit verdeckender visueller Repräsentanten anzupassen, erhält die Kontextinformationen. Für die korrekte Tiefenwahrnehmung muss der Fakt der Überlagerung kommuniziert werden. Hierfür stehen verschiedene Mittel (z.B. Transparenzen, Konturen) bereit und so sind Phantomzeich-

nungen an die jeweiligen Visualisierungsverfahren anpassbar und durch die Nutzung von *Importance Maps* von diesen unabhängig. Die entwickelten Phantomzeichnungen sind auch in zweidimensionalen Verfahren zur Behandlung von Überlagerungen einsetzbar.

Über die reine Freilegung hinaus, erlauben es die vorgestellten Explosionszeichnungen, zusätzliche Informationen in die visuelle Repräsentation einzubringen. Neben Beschriftungen, die sich ganz offensichtlich eignen, um konkrete Werte oder die Identitäten der visuellen Repräsentanten zu kommunizieren, vermitteln auch der animierte Explosionsprozess (etwa über die Explosionsreihenfolge und -richtung) und eingebrachte Linien, Pfeile und Ähnliches zusätzliche Informationen. Diese Informationen unterstützen in erster Linie die Interpretation der Daten, und so lässt sich z.B. mit Explosionszeichnungen die Schachtelungstiefe visualisierter Hierarchien verdeutlichen. Zusätzlich dazu, stellen die verwendeten Explosionszeichnungen einen neuartigen Ansatz dar, auch die eigentliche Funktionsweise und den Aufbau der Visualisierungsverfahren selbst zu vermitteln. Auf diese Weise kann der Zugang zu unbekannten Visualisierungsverfahren erleichtert und deren Verständnis gefördert werden. LAMMARSCH et al. erachten das im Rahmen der vorliegenden Dissertation entwickelte Explosionsverfahren beispielsweise als angemessen, um die Pixelanordnungen in *PixelMaps* zu vermitteln [LAB⁺09].

Die Freilegung visueller Repräsentanten fördert die Lokalisation wichtiger Information, während das Bereitstellen zusätzlicher Details die Interpretation dieser Daten unterstützt. Beide Verfahren sind somit der illustrativen Informationsvisualisierung zuzuordnen.

Phantom- und Explosionszeichnungen greifen in das im Visualisierungsprozess erzeugte geometrische Modell ein. Um die Effektivität und Expressivität der visuellen Repräsentation zu wahren, muss deshalb bei ihrer Anwendung darauf geachtet werden, dass keine Widersprüche zur gewählten Kodierung der Daten entstehen. Die vorgestellten Beispiele demonstrieren aber, dass dies durch geordnete nachvollziehbare Explosionen (z.B. achsenparallel, interaktionsgesteuert und animiert) oder den Einsatz von Konturen statt Transparenzen möglich ist.

Während Phantomzeichnungen trotzdem weitestgehend unabhängig vom genutzten Visualisierungsverfahren sind, sind Explosionszeichnungen meist an die konkrete Visualisierungstechnik anzupassen. Dieser Aspekt ist vorrangig der Vielfalt möglicher geometrischer Modelle zuzuschreiben, was damit einen gewissen Mehraufwand beim Einsatz dieser Technik bedingt.

7. Zusammenfassung

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich ausführlich mit dem Gebiet der illustrativen Informationsvisualisierung. Auf konzeptueller Ebene wurde dazu die Kombinierbarkeit von *Informationsvisualisierung* und *Nicht-photorealistischem Rendering* (NPR) systematisiert. Die durchgeführte Untersuchung beruht auf zwei Modellen: Das von CHI und RIEDL etablierte Data-State-Referenzmodell ermöglicht die Beschreibung sämtlicher Visualisierungstechniken der Informationsvisualisierung mit Hilfe von Datenzuständen und Operatoren auf diesen Zuständen [CR98]. In gleicher Art und Weise erlauben die von HALPER et al. und SCHLECHTWEIG identifizierten vier NPR-Bereiche und ihre Beziehungen zueinander eine abstrakte Beschreibung der NPR-Methoden [HIR⁺03, Sch07]. Die Diskussion der Kombinationsmöglichkeiten ergab, dass viele NPR-Verfahren in der Informationsvisualisierung zwar prinzipiell genutzt werden können, dass hierbei jedoch noch wichtige Probleme aufgrund fehlender Transformationen und der inhärenten Unidirektionalität des Data-State-Referenzmodells zu lösen sind.

Basierend auf diesen Betrachtungen wurde zunächst das erweiterte Data-State-Referenzmodell entwickelt, das eine fundierte theoretische Grundlage für die illustrative Informationsvisualisierung darstellt. Es erlaubt die Integration der vier NPR-Bereiche in das Data-State-Referenzmodell. So können nun Bildmanipulationsverfahren, Modellmanipulationsverfahren, Zusätzliche Grafikprimitive und die notwendigen zusätzlichen Transformationen in der Informationsvisualisierung angewendet werden. Das erweiterte Data-State-Referenzmodell ermöglicht damit eine allgemeingültige Beschreibung illustrativer Verfahren in der Informationsvisualisierung. Neben der Einordnung existierender Einzellösungen in diesem Bereich erlaubt es vor allem die Entwicklung neuer prinzipieller Lösungsansätze, beispielsweise bezüglich der Unsicherheitsvisualisierung oder beim Umgang mit Überlagerungen. Dies wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation an zahlreichen und vielseitigen entwickelten Lösungsansätzen demonstriert. So wurden Methoden aus allen vier NPR-Bereichen im Zusammenhang mit verschiedenen zwei- und dreidimensionalen Visualisierungsverfahren verwendet, mit denen sich etwa multivariate Daten (mit und ohne Raum- bzw. Zeitbezug) aber auch Graphen und Hierarchien visualisieren lassen. Die entwickelten Methoden fokussieren in erster Linie die Kommunikation visualisierter Daten. So wurden Verfahren entwickelt, die die Lokalisation wichtiger Informationen unterstützen, deren Sichtbarkeit gewährleisten oder zusätzliche Details in die Visualisierung einbringen.

Die Anwendbarkeit der erarbeiteten illustrativen Ansätze ist aber nicht auf die vorgestellten und ausführlich diskutierten Problemstellungen in existierenden Visualisierungsverfahren beschränkt. Durch Nutzung etwa der im NPR gebräuchlichen *G-Buffer* sind viele der vorgestellten Methoden weitestgehend unabhängig vom genutzten Visualisierungsverfahren. Auf diese Weise sind die im Rahmen der Arbeit entwickelten Ansätze sowohl zur Lösung aktueller Forschungsfragen als auch in ganz konkreten Anwendungen ohne weiteres einsetzbar. Dies soll nachfolgend an zwei Beispielen demonstriert werden: Um zu zeigen, wie illustrative Techniken zur Bearbeitung aktueller Forschungsfragen beitragen können, soll die schwierige Veranschaulichung des Zusammenspiels von Parametern, Daten und Unsicherheiten betrachtet werden. Als Beispiel für die Integration in eine konkrete Anwendung werden Molekülbewegungen auf der Zelloberfläche betrachtet.

Parameter, Daten und Unsicherheiten Die visuelle Analyse des Zusammenspiels von Parametern, Daten und auftretenden Unsicherheiten gehört zu den wichtigen Themen der aktuellen Forschungsagenda. Spezielle Tutorials, Workshops und aktuelle *Calls* (z.B. [HBG⁺12, MBDK13, HBG13]) belegen das verstärkte Interesse an Lösungen in diesem Bereich. Die Schwierigkeiten ergeben sich hier vor allem aus dem Ziel, die drei genannten Aspekte *zusammen* zu betrachten – also Tausende verschiedener Parameterkombinationen zusammen mit den davon beeinflussten umfangreichen Datenreihen und den jeweils assoziierten Unsicherheiten darzustellen. Verschiedenartige Wertebereiche erschweren so eine Kombination zusätzlich. Die dadurch bedingte Komplexität der Visualisierungen erschwert wiederum die Interpretation der Daten.

Zu diesem Themenbereich wurden eigene Publikationen veröffentlicht (vgl. [LMS⁺12, LRE⁺12, LRHS14]), die sich mit der Exploration von Daten, Parametern und Unsicherheiten bei der Simulation biologischer Prozesse befassen. Die entwickelten Ansätze beruhen dabei auf zwei wesentlichen Punkten: (1) der Ausnutzung von Heterogenitätsinformationen und (2) einer kompakten Kodierung von Daten und Unsicherheiten, um jeweils die Parameterabhängigkeiten zu kommunizieren.

- ▷ **Nutzung von Heterogenitätsinformationen** Viele Simulationsprozesse erlauben es, die Granularität der durchgeführten Simulationen aber auch die Anzahl der zu untersuchenden Parameterkombinationen frei zu wählen. Während bei zu groben Auflösungen Informationen verloren gehen können, kann eine zu feine Auflösung zu hohem Rechenaufwand führen, ohne dabei zusätzliche Informationen zu generieren. Ein neu entwickelter und später erweiterter Ansatz (vgl. [LMS⁺12, LRHS14]) betrachtet die Daten und verwendeten Parameterkombinationen auf unterschiedlichen Skalen. Die grundsätzliche Idee besteht darin, die Unterschiede zwischen benachbarten Skalen als Indikator für neue Informationen auf einer höher aufgelösten Skala zu nutzen. Kleine Heterogenitäten weisen somit auf Bereiche, in denen gröbere Simulationen zulässig sind, ohne Informationen zu verlieren, große Heterogenitäten hingegen auf Bereiche, in denen nur fein aufgelöste Simulationen alle Datencharakteristika erfassen oder in denen zusätzliche feiner abgestufte Parameterkombinationen zu untersuchen sind.

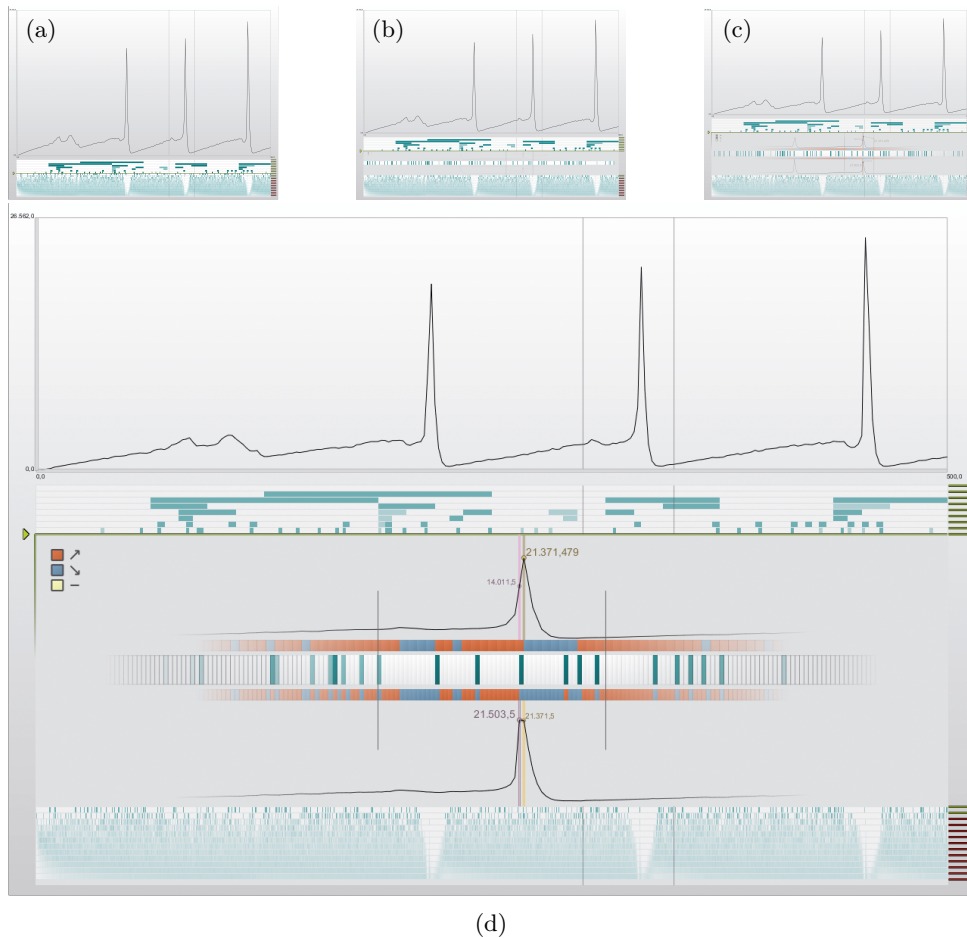


Abbildung 7.1.: Explosionszeichnungen zum Verständnis dargestellter Heterogenitätsinformationen. Diese deuten auf beachtenswerte Datenbereiche auf feineren oder gröberen Skalen hin (a) (vgl. [LMS⁺12, LRHS14]). Die Explosionszeichnung (b)–(d) unterstützt die Interpretation der Heterogenitäten: Ein selektierter Bereich wird freigelegt und um erklärende zusätzliche graphische Elemente angereichert. Die blaugrünen Heterogenitäten deuten auf Unterschiede in den Verläufen, die nun explizit dargestellt werden (d) (rot: steigend, blau: fallend). Zusätzliche Beschriftungen kommunizieren konkrete Datenwerte.

In den beiden genannten Publikationen konnten mittels dargestellter Heterogenitäten mehrere interessante Bereiche sowohl im Datenraum als auch im Parameterraum identifiziert werden (siehe [LMS⁺12, LRHS14]). Auf diese Weise unterstützt die Visualisierung der Heterogenitäten die Exploration der Daten und die Parametrisierung weiterer Simulationsläufe. Aus dieser visuellen Repräsentation ist aber nicht zu entnehmen, welche konkrete Metrik (z.B. Euklidischer Abstand) verwendet wird und wie die Heterogenitäten dementsprechend zu interpretieren sind.

Aus diesem Grund wurden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Techniken aus dem Bereich der Modellmanipulationen und der zusätzlichen Grafikprimitive angewendet. Über eine angepasste Explosionszeichnung (vgl. Kap. 6.3) sowie zusätzliche grafische Elemente lassen sich Informationen bereitstellen, die das Verständnis der genutzten Heterogenitätsmaße fördern: In Abbildung 7.1(a)–(d) wird ein interaktiv selektierter Bereich der so genannten Heterogenitätsbänder freilegt. Das dargestellte Heterogenitätsmaß (blaugrün) erfasst Heterogenitäten in den Datenverläufen auf den verschiedenen Skalen. Um die Unterschiede zu verdeutlichen, werden die betroffenen Datenkurven und deren Verlauf mittels zusätzlicher *Visual Cues* explizit sichtbar gemacht (rot: steigend, blau: fallend, gelb: konstant). So werden nicht nur punktuelle Unterschiede dargestellt sondern auch die Heterogenitäten in den lokalen Kontext gesetzt. Die zusätzlichen Beschriftungen (vgl. Kap. 5.3) kommunizieren konkrete Datenwerte und verdeutlichen die Verschiebung der Extremwerte im selektierten Bereich – die Ursache für die erfassten Heterogenitäten.

- ▷ **Kompakte Datenkodierung** In Simulationen sind in der Regel die resultierenden Daten aber auch assoziierte Unsicherheiten von Parametern abhängig. Die Veranschaulichung dieses Zusammenspiels ist gerade bei tausenden untersuchten Parameterkombinationen schwierig. Ein Lösungsansatz besteht in der Nutzung einer sehr kompakten Kodierung (vgl. [LRE⁺12, LRHS14]), die Unsicherheiten beziehungsweise die Simulationsdaten zeilenweise über die Einfärbung von Pixeln visualisiert. Die jeweilig genutzte Parameterkombination wird ebenso zeilenweise über eine Art Strichcode vermittelt (vgl. Abb.7.2). Auf diese Weise gelingt es, für tausende Parameterkombinationen die Zusammenhänge zwischen Parametern und Unsicherheiten beziehungsweise Parametern und Simulationsdaten sichtbar und analysierbar zu machen. Allerdings ist die gleichzeitige Darstellung aller drei Aspekte in einer visuellen Repräsentation bisher nicht möglich.

Wie in Kapitel 4.2.3 gezeigt, können mit Bildmanipulationen wie der Aquarellsimulation Unsicherheiten und Daten in einer Darstellung zusammengeführt werden. Die Abbildungen 7.2(a) und (b) zeigen den Visualisierungsansatz aus [LRHS14] mit den eigentlichen Simulationsdaten (a) und Standardabweichungen der stochastischen Simulation (b). Werden letztere Unsicherheiten punktuell auf die *Pigmentaufnahme* einer Aquarellsimulation abgebildet (vgl. Kap. 4.2.3), wird hierdurch ganz gezielt ein Bildrauschen erzeugt, das die Unsicherheiten in (c) zusätzlich zu den Simulationsdaten sichtbar macht. Auf diese Weise können Unsicherheiten trotz der kompakten Darstellung in die Visualisierung der Daten integriert werden und sind zumindest qualitativ bewertbar. In Abbildung 7.2(c) wird damit in nur *einer* visuellen Repräsentation deutlich, dass die Standardabweichung wie die Daten selbst von den Parametern kW_{syn} , $k\beta_{tasyn}$, kA_{deg} abhängig ist und mit höheren Parameterausprägungen zunimmt.

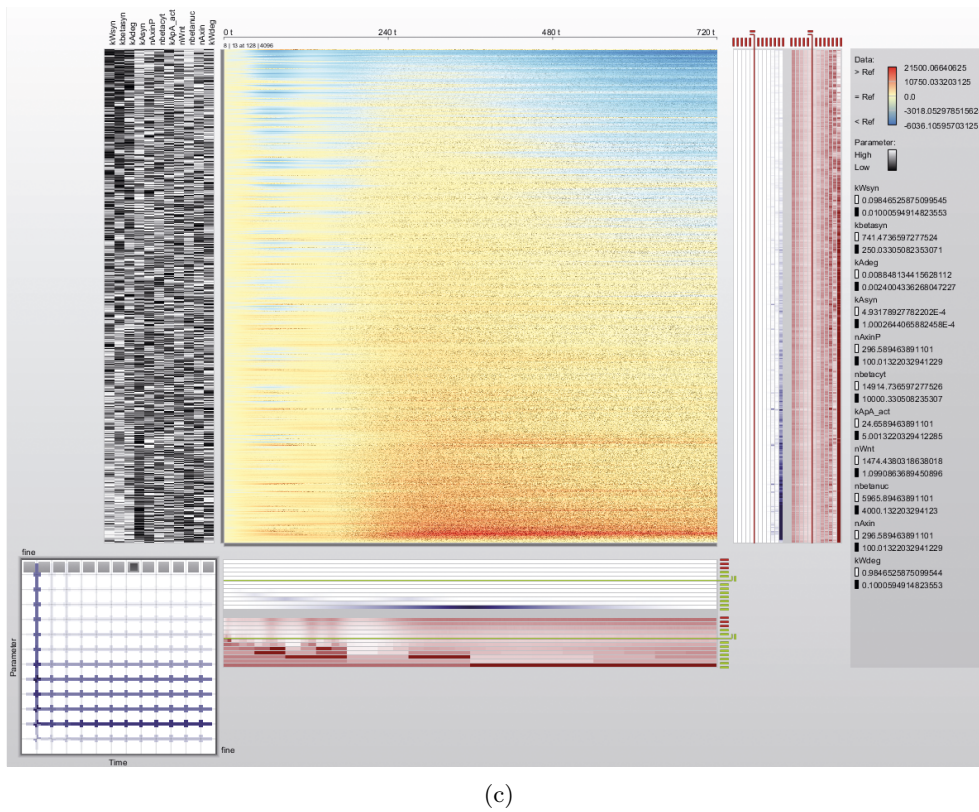
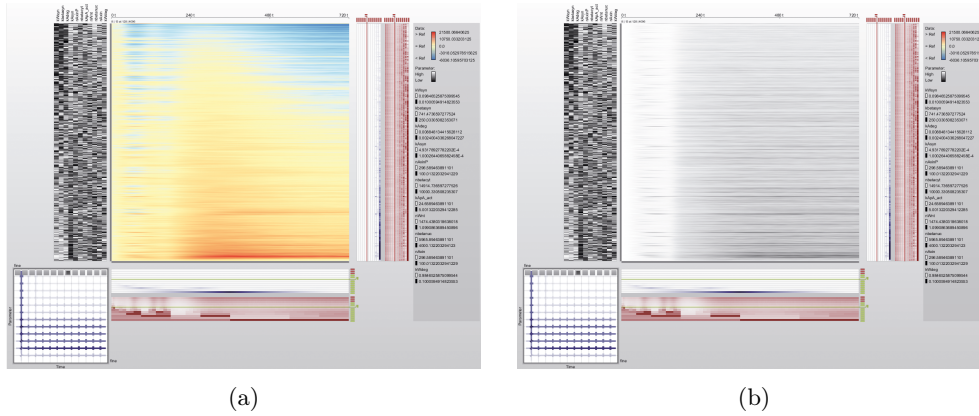


Abbildung 7.2.: Aquarellsimulation zur Visualisierung von Unsicherheiten. Durch Abbildung der Unsicherheitswerte auf die *Pigmentaufnahmekapazität* der Aquarellsimulation gelingt es, die Visualisierung der Unsicherheiten (b) in die Darstellung der eigentlichen Daten (a) zu integrieren. Das erzeugte Bildrauschen (c) erlaubt zumindest eine qualitative Einschätzung der Unsicherheiten und macht bereits Zusammenhänge zu den Simulationsparametern (links: Graustufen) sichtbar.

Beide vorgestellten Erweiterungen zeigen, dass die im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Verfahren ohne weiteres für die Bearbeitung aktueller Fragestellungen verwendet werden können und einfach auf andere Visualisierungsverfahren übertragbar sind. Für ein tieferes Verständnis der Komplexität der Verfahren und der jeweils betrachteten Problemstellungen sind die Publikationen *Heterogeneity-based Guidance for Exploring Multiscale Data in Systems Biology* und *Supporting the Integrated Visual Analysis of Input Parameters and Simulation Trajectories* in Teil II auf den Seiten 131 bzw. 133 dieser Dissertation wiedergegeben. Im Folgenden soll nun eine konkrete Anwendung betrachtet werden.

Molekülbewegungen auf der Zelloberfläche Bei der Simulation biologischer Prozesse spielen in jüngerer Zeit auch räumliche Aspekte und Bewegungsdaten eine zunehmend wichtige Rolle. Die visuelle Analyse von Bewegungsdaten auf der Zelloberfläche wird dabei vor allem durch das chaotische Bewegungsverhalten der Moleküle erschwert, da dieses zu starkem *Visual Clutter* und entsprechend starken Überlagerungen führt. Eine eigene Publikation setzt sich mit diesem Problem auseinander und führt mittels verschiedener Filtermechanismen zu ersten Erkenntnissen bezüglich des Simulationsprozesses (vgl. [LTB⁺12]). Das *Visual Clutter* erlaubt jedoch keine Analyse vollständiger Trajektorien oder den Einsatz etablierter dreidimensionaler Verfahren wie des *Space-Time Cubes* (vgl. [AAS14]) oder spezieller Methoden wie der *Trajectory Wall* [TSAA12].

Mit Hilfe der in Kapitel 6.2 vorgestellten Phantomzeichnungen ist es in diesem speziellen Anwendungsfall jedoch möglich, einzelne interessierende Trajektorien in dreidimensionalen Verfahren blickpunktunabhängig sichtbar zu machen. Zu diesem Zweck wird aus den freizulegenden Trajektorien innerhalb der *Trajectory Wall* zunächst eine *Importance Map* erzeugt (Abb. 7.3(b)). Diese dient während der *Rendering*-Transformation dazu, die Sichtbarkeit der überlagernden Trajektorien lokal anzupassen und nur deren Konturen transparent darzustellen (Abb. 7.3(c)). Der beschriebene illustrative Ansatz unterstützt auf diese Weise die Analyse einzelner Trajektorien und zugehöriger Attribute, die ansonsten kaum sichtbar wären (vgl. Abb. 7.3(a)).

Die dargestellten aktuellen Arbeiten verdeutlichen am Beispiel, dass die im Rahmen dieser Dissertation entwickelten illustrativen Ansätze weitreichend genutzt werden können.

Darüber hinaus sei aber festgehalten, dass aufgrund des Umfangs der zur Verfügung stehenden NPR-Techniken nicht alle existierenden NPR-Verfahren in der vorliegenden Dissertation betrachtet werden konnten. Das entwickelte erweiterte Data-State-Referenzmodell und die umgesetzten Methoden legen jedoch nahe, dass die Nutzung weiterer NPR-Verfahren möglich und sinnvoll sein kann, um durch eine entsprechend illustrative Nutzung die Kommunikation von Informationen zu unterstützen. Aus diesem Grund widmet sich der folgende Abschnitt offenen Fragestellungen einer illustrativen Informationsvisualisierung und möglichen Ansätzen, die weitere Problemstellungen adressieren.

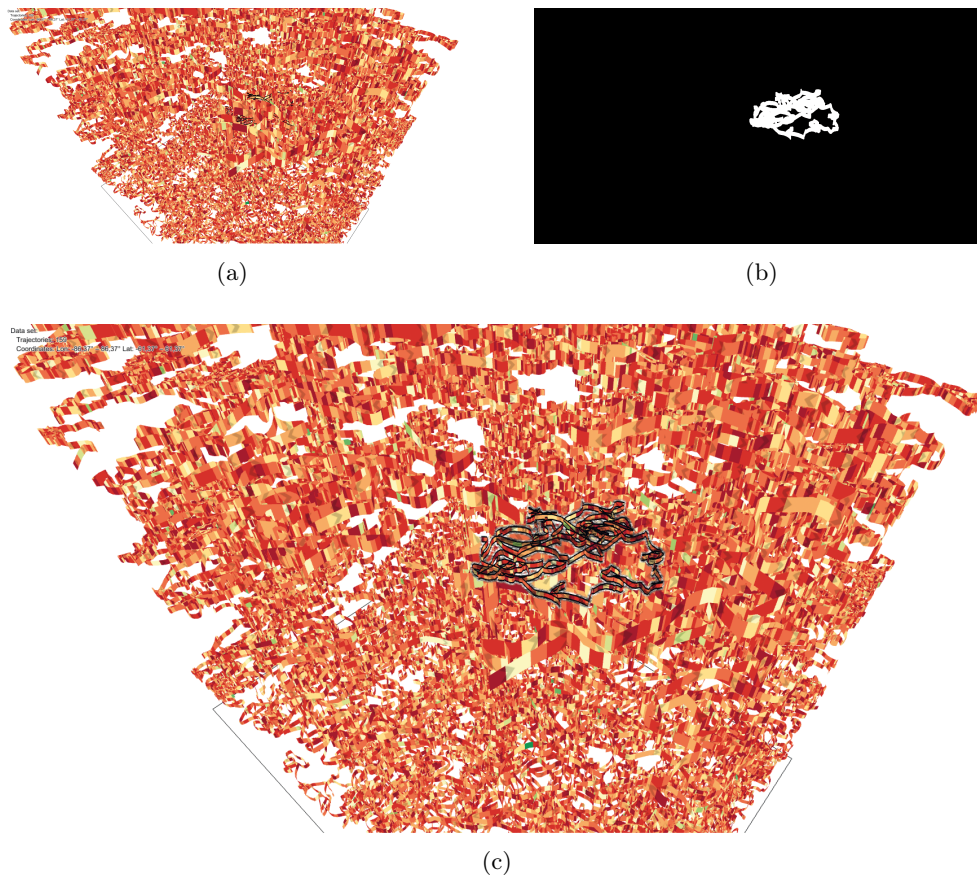


Abbildung 7.3.: Phantomzeichnungen bei der Exploration simulierter Bewegungsvorgänge auf der Zelloberfläche. Trotz umfassenden *Visual Clutters* (a), kann mit dem entwickelten *Importance Map*-Ansatz (b) die Sichtbarkeit einzelner Trajektorien blickpunktunabhängig gewährleistet werden (c).

Ausblick

Die in der vorliegenden Dissertation diskutierten Lösungsansätze und die erzielten Ergebnisse motivieren den Entwurf weiterer Techniken auf Basis des vorgestellten erweiterten Data-State-Referenzmodells. Hierfür können erneut alle NPR-Bereiche genutzt werden:

- ▷ **Bildmanipulationen** Die präsentierte Visualisierung von Unsicherheiten mit der Aquarellsimulation motiviert die Anwendung etwa bei der Visualisierung von Unsicherheiten in Geländedaten oder in Bewegungsdaten. Auch hier können verschwommene oder verrauschte visuelle Repräsentanten oder Geländestrukturen zur Kommunikation der Unsicherheiten dienen. Gleichzeitig gibt es viele weitere Bildmanipulationsverfahren, die für eine derartige Visualisierung in Frage kommen, zum Beispiel das

Dithering (vgl. Kap. 2.2.3), Stiftzeichnungen (z.B. [LKL06, YM12, YKM12]) oder das bereits von KOSARA genutzte *Blurring* [Kos01]. Eine Nutzerstudie, die mehrere dieser Verfahren in einer solchen Anwendung gegenüberstellt, ist derzeit in Vorbereitung.

- ▷ **Modellmanipulationen** Auch in diesem Bereich ergeben sich einige konkrete Ansätze, die in zukünftigen Arbeiten zu untersuchen sind. So besteht die Idee, Explosionszeichnungen bei der Analyse von Trajektorien innerhalb der *Trajectory Wall* zu nutzen, um hiermit die Selbstverdeckung etwa in Kreisen zu behandeln. Ebenso ist es möglich, durch hochfrequente Überlagerungen entlang ruhiger Bewegungspfade Unsicherheiten zu kommunizieren. Letzter Ansatz ließe sich auch auf Geländedaten übertragen und würde einem existierenden Ansatz für Volumendaten [GR04] ähneln.

- ▷ **Zusätzliche Grafikprimitive** Nachdem sich die vorliegende Arbeit erfolgreich der Schriftplatzierung gewidmet hat, rückt zukünftig die Schriftgestaltung in den Vordergrund. Hierbei kann etwa auf vorige Arbeiten (z.B. [Lub05]) aufgebaut werden, wobei zunächst konkrete Skalen zum Beispiel für Schriftgrößen, Schriftstärken u.Ä. zu untersuchen sind. Im Zusammenhang mit der Schriftplatzierung sind außerdem Erweiterungen angedacht, die beispielsweise die Beschriftung von Trajektorien oder von Themenkarten nach kartographischen Aspekten ermöglichen – die Beschriftungen unter anderem den Hauptausdehnungen folgen und so die Interpretation dieser Informationen unterstützen.

Neben Beschriftungen gibt es auch konkrete Überlegungen, *Strokes* für die Visualisierung mehrerer Attribute entlang von Trajektorien einzusetzen oder über den in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Ansatz Unsicherheiten darzustellen.

- ▷ **Zusätzliche Transformationen** In der vorliegenden Dissertation aber auch in einer betreuten studentischen Arbeit [Vir08] wurde gezeigt, dass es durch zusätzliche Transformationen möglich ist, Texturen oder auch *Strokes* mittels der Bilddatenebene zu definieren. Diesbezüglich ist es der nächste Schritt, diesen Ansatz etwa an konkreten *Node-Link*-Diagrammen anzuwenden und die hier dargestellten Kanten, durch datenrepräsentierende *Strokes* zu ersetzen.

Neben diesen Fragestellungen, die sich aus den vier NPR-Bereichen ableiten lassen, ergeben sich aber auch interessante Fragestellungen bezüglich der illustrativen Informationsvisualisierung. An erster Stelle gehört hierzu die Auswahl und Parametrisierung der illustrativen Techniken für Verfahren in der Informationsvisualisierung. Das entworfene erweiterte Data-State-Referenzmodell erlaubt, wie gezeigt, die Entwicklung neuer Techniken für die Informationsvisualisierung und die Einordnung existierender illustrativer Verfahren. Es bleibt jedoch offen, welches Verfahren sich in welchem Anwendungsfall am ehesten eignet. Die Frage nach der Auswahl einer geeigneten Visualisierung ist prinzipiell ein offener Forschungsgegenstand und damit auch in der Informationsvisualisierung

nicht abschließend beantwortet. Deshalb wird zunächst davon ausgegangen, dass der Einsatz der entwickelten illustrativen Ansätze vom Autor einer Visualisierung abhängig ist. Weitere Arbeiten könnten hierfür automatische Ansätze untersuchen.

Neben der Auswahl einer entsprechenden illustrativen Informationsvisualisierung stellt sich zudem die Frage nach einer geeigneten Parametrisierung. Hierzu sind umfangreiche Studien notwendig, um die zur Visualisierung in Frage kommenden Parameter der NPR-Verfahren und deren Wertebereiche zu identifizieren. Trotz der vielen Möglichkeiten führen meist nur wenige Parameter zu visuell derart unterscheidbaren Effekten, dass sie sich für die Informationsvisualisierung eignen. Auch diese Untersuchungen sind für eine breite Anwendung illustrativer Verfahren notwendig.

Ebenso wichtig ist die Evaluation illustrativer Verfahren. Diese ist nicht nur für die Beurteilung unterschiedlicher Parametrisierungen notwendig, sondern auch, um den Nutzen der entwickelten illustrativen Verfahren zu quantifizieren. Die in dieser Dissertation durchgeführten Untersuchungen zu Halos und zum *Weaving* sind erste Schritte, die eine prinzipielle Eignung belegen. Schwieriger scheint es, zu untersuchen, in welchem Umfang beispielsweise Explosionszeichnungen das Verständnis einer Visualisierungstechnik fördern können, ob die blickpunktunabhängige Sichtbarkeit visueller Repräsentanten in Phantomzeichnungen interpretierbar ist oder ob diese eventuell zu Fehlinterpretationen führen kann. Der letzte Punkt, eine mögliche Verletzung der Expressivität, ist generell für illustrative Ansätze zu untersuchen. Erste Erkenntnisse hierzu sind in [WII⁺12] dargestellt. Diese Untersuchungen sind fortzuführen.

Teil II

Dissertationsrelevante
Publikationen

8. A new Weaving Technique for Handling Overlapping Regions

Diese Publikation wurde in Erstautorenschaft zusammen Dipl. Inf. Axel Radloff und Prof. Dr.-Ing. habil. Heidrun Schumann verfasst und auf der *Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI'10)* vorgestellt [LRS10a]. Das beschriebene Verfahren gehört vorrangig zum NPR-Bereich der Bildmanipulationen und ist somit Teil von Kapitel 4.

Bibliographische Angaben: LUBOSCHIK, Martin ; RADLOFF, Axel ; SCHUMANN, Heidrun: A new Weaving Technique for Handling Overlapping Regions. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI'10)*, ACM Press, 2010, S. 25–32.

Zusammenfassung: The use of transparencies is a common strategy in visual representations to guarantee the visibility of different overlapping graphical objects, especially, if no visibility-deciding order is given (e.g., importance, depth). Alpha-blending, however, could generate new colors that are not specified by the given color scale and overlapping shapes may become difficult to be separated visually and the selection of specific elements would be difficult. In this paper, we present a new approach for representing overlapping regions: Instead of blending different colors, our weaving technique separates the original colors and shapes are easier to differentiate. Due to a deterministic weaving order, all overlapping objects are visible. We apply our approach to scatter plot visualizations to enhance the communication of overlapping clusters.

Veröffentlichungsrechte: Die genannte Publikation wird durch *ACM Press* verlegt und ist in dieser elektronischen Form der Dissertation deshalb nicht enthalten. Sie kann über die DOI: [10.1145/1842993.1842999](https://doi.org/10.1145/1842993.1842999) abgerufen werden.

9. Particle-Based Labeling: Fast Point-Feature Labeling without Obscuring Other Visual Features

Diese Publikation wurde in Erstautorenschaft zusammen mit Prof. Dr.-Ing. habil. Heidrun Schumann und Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Hilko Cords verfasst und auf der Konferenz *IEEE Information Visualization (InfoVis'08)* vorgestellt [LSC08]. Das beschriebene Verfahren gehört vorrangig zum NPR-Bereich der Zusätzlichen Grafikprimitive und ist somit Teil von Kapitel 5.

Bibliographische Angaben: LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun ; CORDS, Hilko: Particle-Based Labeling: Fast Point-Feature Labeling without Obscuring Other Visual Features. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 14 (2008), Nr. 6, S. 1237–1244.

Zusammenfassung: In many information visualization techniques, labels are an essential part to communicate the visualized data. To preserve the expressiveness of the visual representation, a placed label should neither occlude other labels nor visual representatives (e.g., icons, lines) that communicate crucial information. Optimal, non-overlapping labeling is an NP-hard problem. Thus, only a few approaches achieve a fast non-overlapping labeling in highly interactive scenarios like information visualization. These approaches generally target the point-feature label placement (PFLP) problem, solving only label-label conflicts.

This paper presents a new, fast, solid and flexible 2D labeling approach for the PFLP problem that additionally respects other visual elements and the visual extent of labeled features. The results (number of placed labels, processing time) of our particle-based method compare favorably to those of existing techniques. Although the esthetic quality of non-real-time approaches may not be achieved with our method, it complies with practical demands and thus supports the interactive exploration of information spaces. In contrast to the known adjacent techniques, the flexibility of our technique enables labeling of dense point clouds by the use of non-occluding distant labels. Our approach is independent of the underlying visualization technique, which enables us to demonstrate the application of our labeling method within different information visualization scenarios.

Veröffentlichungsrechte: Die genannte Publikation wird durch *IEEE Computer Society* verlegt und ist in dieser elektronischen Form der Dissertation deshalb nicht enthalten. Sie kann über die DOI: [10.1109/TVCG.2008.152](https://doi.org/10.1109/TVCG.2008.152) abgerufen werden.

10. Explode to Explain – Illustrative Information Visualization

Diese Publikation wurde als Erstautor mit Prof. Dr.-Ing. habil. Heidrun Schumann verfasst und auf der *International Conference Information Visualization (IV'07)* präsentiert [LS07b]. Das beschriebene Verfahren gehört vorrangig zum NPR-Bereich der Modellmanipulationen und ist somit Teil von Kapitel 6.

Bibliographische Angaben: LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun: Explode to Explain – Illustrative Information Visualization. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualisation (IV'07)*, IEEE Computer Society, 2007, S. 301–307.

Zusammenfassung: Due to complexity, modern visualization techniques for large data volumes and complex interrelationships are difficult to understand for non-expert users and even for expert users the visualization result may be difficult to interpret. Often the limited screen space and the risk of occlusion hinders a meaningful explanation of techniques or datasets by additional visual elements. This paper presents a novel way how views from information visualization can be adapted by the use of the well-known illustrative technique exploded view, to successfully face the problems described above. The application of exploded views gains screen space for an explanation in a smart way and acts explanatory itself. With our approach of illustrating visual representations, the understanding of complex visualization techniques is eased and new comprehensible views on data are given.

Veröffentlichungsrechte: Die genannte Publikation wird durch *IEEE Computer Society* verlegt und ist in dieser elektronischen Form der Dissertation deshalb nicht enthalten. Sie kann über die DOI: [10.1109/IV.2007.50](https://doi.org/10.1109/IV.2007.50) abgerufen werden.

11. Heterogeneity-based Guidance for Exploring Multiscale Data in Systems Biology

Diese Publikation wurde als Erstautor mit Dr. Ing. Carsten Maus, Dr. Ing. Hans-Jörg Schulz, Prof. Dr.-Ing. habil. Heidrun Schumann und Prof. Dr. rer. nat. habil. Adelinde M. Uhrmacher verfasst und auf dem *2nd IEEE Symposium on Biological Data Visualization (BioVis'12)* veröffentlicht [LMS⁺12]. In dem beschriebenen Verfahren lassen sich als Erweiterung etwa Explosionszeichnungen und Beschriftungen dafür nutzen, um die Kommunikation visualisierter Informationen zu unterstützen (vgl. Kap. 7).

Bibliographische Angaben: LUBOSCHIK, Martin ; MAUS, Carsten ; SCHULZ, Hans-Jörg ; SCHUMANN, Heidrun ; UHRMACHER, Adelinde M.: Heterogeneity-based Guidance for Exploring Multiscale Data in Systems Biology. In: *Proceedings of the 2nd IEEE Symposium on Biological Data Visualization (BioVis'12)*, IEEE Computer Society, 2012, S. 33–40.

Zusammenfassung: In systems biology, analyzing simulation trajectories at multiple scales is a common approach when subtle, detailed behavior and fundamental, overall behavior of a modeled system are to be investigated at the same time. A variety of multiscale visualization techniques provide solutions to handle and depict data at different scales. Yet the mere existence of multiple scales does not necessarily imply the existence of additional information on each of them: Data on a more fine-grained scale may not always yield new details, but instead reflect the already known data from more coarse-grained scales – just at a higher resolution. Nevertheless, to be sure of this, all scales have to be explored.

We address this issue by guiding the exploration of simulation trajectories according to information about the deviation of the data between subsequent scales. For this purpose, we apply different dissimilarity measures to the simulation data at subsequent scales to automatically discern heterogeneous regions that exhibit deviating behavior on more fine-grained scales. We mark these regions and display them alongside the actual data in a multiscale visualization. By doing so, our approach provides valuable visual cues on whether it is worthwhile to drill-down further into the multiscale data and if so, where additional information can be expected. Our approach is demonstrated by an exploratory walk-through of stochastic simulation results of a biochemical reaction network.

Veröffentlichungsrechte: Die genannte Publikation wird durch *IEEE Computer Society* verlegt und ist in dieser elektronischen Form der Dissertation deshalb nicht enthalten. Sie kann über die DOI: [10.1109/BioVis.2012.6378590](https://doi.org/10.1109/BioVis.2012.6378590) abgerufen werden.

12. Supporting the Integrated Visual Analysis of Input Parameters and Simulation Trajectories

Folgende Publikation wurde als Erstautor mit M.Sc. Bioinformatics Fiete Haack, Dipl. Inf. Stefan Rybacki und Dr. Ing. Hans-Jörg Schulz verfasst und in der Spezialausgabe zur Parameter- und Unsicherheitsvisualisierung der Zeitschrift *Computers & Graphics* veröffentlicht. Das publizierte Verfahren adressiert in erster Linie die Exploration des Parameterraums von Simulationsverfahren, kann durch eine Erweiterung um Bildmanipulationen aber auch zusätzlich assoziierte Unsicherheiten kommunizieren (vgl. Kap. 7).

Bibliographische Angaben: LUBOSCHIK, Martin ; HAACK, Fiete ; RYBACKI, Stefan ; SCHULZ, Hans-Jörg : Supporting the Integrated Visual Analysis of Input Parameters and Simulation Trajectories. In: *Computers & Graphics* 39 (2014), S. 37–47.

Zusammenfassung: The visualization of simulation trajectories is a well-established approach to analyze simulated processes. Likewise, the visualization of the parameter space that configures a simulation is a well-known method to get an overview of possible parameter combinations. This paper follows the premise that both of these approaches are actually two sides of the same coin: Since the input parameters influence the simulation outcome, it is desirable to visualize and explore both in a combined manner. The main challenge posed by such an integrated visualization is the combinatorial explosion of possible parameter combinations. It leads to insurmountably high simulation runtimes and screen space requirements for their visualization. The Visual Analytics approach presented in this paper targets this issue by providing a visualization of a coarsely sampled subspace of the parameter space and its corresponding simulation outcome. In this visual representation, the analyst can identify regions for further drill-down and thus finer subsampling. We aid this identification by providing visual cues based on heterogeneity metrics. These indicate in which regions of the parameter space deviating behavior occurs at a more fine-grained scale and thus warrants further investigation and possible re-computation. We demonstrate our approach in the domain of systems biology by a visual analysis of a rule-based model of the canonical Wnt signaling pathway that plays a major role in embryonic development. In this case, the aim of the domain experts was to systematically explore the parameter space to determine those parameter configurations that match experimental data sufficiently well.

Veröffentlichungsrechte: Die genannte Publikation wird durch *Elsevier Ltd.* verlegt und ist in dieser elektronischen Form der Dissertation deshalb nicht enthalten. Sie kann über die DOI: [10.1016/j.cag.2013.09.004](https://doi.org/10.1016/j.cag.2013.09.004) abgerufen werden.

Literaturverzeichnis

- [AAST14] ANDRIENKO, Gennady ; ANDRIENKO, Natalia ; SCHUMANN, Heidrun ; TOMINSKI, Christian: Visualization of Trajectory Attributes in Space-Time Cube and Trajectory Wall. In: BUCHROITHNER, Manfred (Hrsg.) ; PRECHTEL, Nikolas (Hrsg.) ; BURGHARDT, Dirk (Hrsg.): *Cartography from Pole to Pole*. Springer, 2014, S. 157–163
- [AB09] AHN, Jae-wook ; BTUSILOVSKY, Peter: Adaptive Visualization of Search Results: Bringing User Models to Visual Analytics. In: *Information Visualization* 8 (2009), Nr. 3, S. 167–179
- [AES05] AMAR, Robert ; EAGAN, James ; STASKO, John: Low-Level Components of Analytic Activity in Information Visualization. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'05)*, IEEE Computer Society, 2005, S. 111–117
- [AHS05] ALI, Kamran ; HARTMANN, Knut ; STROTHOTTE, Thomas: Label Layout for Interactive 3D Illustrations. In: *The Journal of WSCG* 13 (2005), Nr. 1, S. 1–8
- [Ali09] ALI, Kamran: *Adaptive Layout for Interactive Documents*, Universität Rostock, Deutschland, Diss., 2009
- [APH⁺03] AGRAWALA, Maneesh ; PHAN, Doantam ; HEISER, Julie ; HAYMAKER, John ; KLINGNER, Jeff ; HANRAHAN, Pat ; TVERSKY, Barbara: Designing Effective Step-By-Step Assembly Instructions. In: *ACM Transactions on Graphics* 22 (2003), Nr. 3, S. 828–837
- [ARS79] APPEL, Arthur ; ROHLF, F. J. ; STEIN, Arthur J.: The Haloed Line Effect for Hidden Line Elimination. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'79)*, ACM Press, 1979, S. 151–157
- [BBGP11] BATTIATO, Sebastiano ; BLASI, Gianpiero D. ; GALLO, Giovanni ; PUGLISI, Giovanni: Digital Reproduction of Ancient Mosaics. In: STANCO, Filippo (Hrsg.) ; BATTIATO, Sebastiano (Hrsg.) ; GALLO, Giovanni (Hrsg.): *Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation – Analysis, Restoration, and Reconstruction of Ancient Artworks*. CRC Press / Taylor & Francis Ltd, 2011, S. 409–428

- [BBIF12] BOUKHELIFA, Nadia ; BEZERIANOS, Anastasia ; ISENBERG, Tobias ; FEKETE, Jean-Daniel: Evaluating Sketchiness as a Visual Variable for the Depiction of Qualitative Uncertainty. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 18 (2012), Nr. 12, S. 2769–2778
- [BCP⁺12] BRAMBILLA, Andrea ; CARNECKY, Robert ; PEIKERT, Ronald ; VIOLA, Ivan ; HAUSER, Helwig: Illustrative Flow Visualization: State of the Art, Trends and Challenges. In: *EuroGraphics 2012 State of the Art Reports*, Eurographics Association, 2012, S. 75–94
- [BCS04] BLADH, Thomas ; CARR, David A. ; SCHOLL, Jeremiah: Extending Tree-Maps to Three Dimensions: A Comparative Study. In: *Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference on Computer-Human Interaction (APCHI'04)*, Springer, 2004, S. 50–59
- [BDL05] BALZER, Michael ; DEUSSEN, Oliver ; LEWERENTZ, Claus: Voronoi Tree-maps for the Visualization of Software Metrics. In: *Proceedings of the ACM Symposium on Software Visualization (SoftVis'05)*, ACM Press, 2005, S. 165–172
- [BDY06] BEEN, Ken ; DAICHES, Eli ; YAP, Chee: Dynamic Map Labeling. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12 (2006), Nr. 5, S. 773–780
- [Bed01] BEDERSON, Benjamin B.: PhotoMesa: A Zoomable Image Browser Using Quantum Treemaps and Bubblemaps. In: *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'01)*, ACM Press, 2001, S. 71–80
- [Ber81] BERTIN, Jacques: *Graphics and Graphic Information-Processing*. de Gruyter, 1981
- [BF00] BELL, Blaine A. ; FEINER, Steven K.: Dynamic Space Management for User Interfaces. In: *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'00)*, ACM Press, 2000, S. 238–248
- [BF08] BURNS, Michael ; FINKELSTEIN, Adam: Adaptive Cutaways for Comprehensible Rendering of Polygonal Scenes. In: *ACM Transactions on Graphics* 27 (2008), Nr. 5, S. 124:1–124:9
- [BFH01] BELL, Blaine A. ; FEINER, Steven K. ; HÖLLERER, Tobias: View Management for Virtual and Augmented Reality. In: *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'01)*, ACM Press, 2001, S. 101–110

- [BG04] BAUDISCH, Patrick ; GUTWIN, Carl: Multiblending: Displaying Overlapping Windows Simultaneously Without the Drawbacks of Alpha Blending. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'04)*, ACM Press, 2004, S. 367–374
- [BG05] BRUCKNER, Stefan ; GRÖLLER, Eduard: VolumeShop: An Interactive System for Direct Volume Illustration. In: *Proceedings of IEEE Visualization (Vis'05)*, IEEE Computer Society, 2005, S. 671–678
- [BG06] BRUCKNER, Stefan ; GRÖLLER, Eduard: Exploded Views for Volume Data. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12 (2006), Nr. 5, S. 1077–1084
- [BG07a] BRUCKNER, Stefan ; GRÖLLER, Eduard: Enhancing Depth-Perception with Flexible Volumetric Halos. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13 (2007), S. 1344–1351
- [BG07b] BRUCKNER, Stefan ; GRÖLLER, Eduard: Style Transfer Functions for Illustrative Volume Rendering. In: *Computer Graphics Forum* 26 (2007), Nr. 3, S. 715–724
- [BGKG05] BRUCKNER, Stefan ; GRIMM, Sören ; KANITSAR, Armin ; GRÖLLER, Eduard: Illustrative Context-Preserving Volume Rendering. In: *Proceedings of Eurographics / IEEE-VGTC Symposium on Visualization (EuroVis'05)*, Eurographics Association, 2005, S. 69–76
- [BGKG06] BRUCKNER, Stefan ; GRIMM, Sören ; KANITSAR, Armin ; GRÖLLER, Eduard: Illustrative Context-Preserving Exploration of Volume Data. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12 (2006), Nr. 6, S. 1559–1569
- [BHH⁺02] BACH, Katharina ; HANIG, Kristina ; HOFFMANN, Tim ; KRESSE, Wolfgang ; LÖCHERBACH, Julia ; ROSENTHAL, Paul ; RUDNICK, Steffen ; SCHREIBER, Peter ; THON, Michael ; WOLFF, Alexander: Beschriftungsalgorithmen in Theorie & Praxis / Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Deutschland. 2002 (13/2002). Forschungsbericht
- [BHI⁺05] BARTZ, Dirk ; HAGEN, Hans ; INTERRANTE, Victoria ; MA, Kwan-Liu ; PREIM, Bernhard: *Illustrative Rendering Techniques for Visualization: Future of Visualization or Just Another Technique?* Panel at IEEE Visualization (Vis'05), Oktober 2005
- [BHW00] BRULS, Mark ; HUIZING, Kees ; WIJK, Jarke J.: Squarified Treemaps. In: *Proceedings of Joint Eurographics and IEEE TCVG Symposium on Visualization (TCVG 2000)*, IEEE Computer Society, 2000, S. 33–42

- [Bri39] BRINTON, Williard C.: *Graphic Presentation*. First Edition. Brinton Associates, 1939
- [BRL09] BERTINI, Enrico ; RIGAMONTI, Maurizio ; LALANNE, Denis: Extended Eccentric Labeling. In: *Computer Graphics Forum* 28 (2009), Nr. 3, S. 927–934
- [BS04] BERTINI, Enrico ; SANTUCCI, Giuseppe: Quality Metrics for 2D Scatterplot Graphics: Automatically Reducing Visual Clutter. In: *Proceedings of the International Symposium on Smart Graphics (SG'04)*, Springer, 2004, S. 77–89
- [BS05] BERTINI, Enrico ; SANTUCCI, Giuseppe: Improving 2D Scatterplots Effectiveness through Sampling, Displacement, and User Perception. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualisation (IV'05)*, IEEE Computer Society, 2005, S. 826–834
- [BSD09] BALZER, Michael ; SCHLÖMER, Thomas ; DEUSSEN, Oliver: Capacity-Constrained Point Distributions: A Variant of Lloyd's Method. In: *ACM Transactions on Graphics* 28 (2009), Nr. 3, S. 1–8
- [BTK11] BERTINI, Enrico ; TATU, Andrada ; KEIM, Daniel A.: Quality Metrics in High-Dimensional Data Visualization: An Overview and Systematization. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 14 (2011), Nr. 6, S. 2203–2212
- [BWF⁺10] BORN, Silvia ; WIEBEL, Alexander ; FRIEDRICH, Jan ; SCHEUERMANN, Gerik ; BARTZ, Dirk: Illustrative Stream Surfaces. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 16 (2010), Nr. 6, S. 1329–1338
- [CAO09] CHANG, Jianghao ; ALAIN, Benoît ; OSTROMOUKHOV, Victor: Structure-Aware Error Diffusion. In: *ACM Transactions on Graphics* 28 (2009), Nr. 5, S. 162:1–162:8
- [ČB10] ČMOLIK, Ladislav ; BITTNER, Jiří: Layout-aware optimization for interactive labeling of 3D models. In: *Proceedings of the International Symposium on Smart Graphics (SG'08)*, Springer, 2010, S. 378–387
- [CCF96] CARPENDALE, M. Sheelagh T. ; COWPERTHWAIT, David J. ; FRACCHIA, F. D.: Distortion Viewing Techniques for 3-dimensional Data. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'96)*, IEEE Computer Society, 1996, S. 46–53
- [CCF97] CARPENDALE, M. Sheelagh T. ; COWPERTHWAIT, David J. ; FRACCHIA, F. D.: Extending Distortion Viewing from 2D to 3D. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 17 (1997), Nr. 4, S. 42–51

- [CCM10] CHAN, Yu-Hsuan ; CORREA, Carlos D. ; MA, Kwan-Liu: Flow-based Scatterplots for Sensitivity Analysis. In: *Proceedings of IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology (VAST'10)*, IEEE Computer Society, 2010, S. 43–50
- [CCP07] COLLINS, Christopher ; CARPENDALE, Sheelagh ; PENN, Gerald: Visualizing Uncertainty in Lattices to Support Decision-Making. In: *Proceedings of Eurographics / IEEE-VGTC Symposium on Visualization (EuroVis'07)*, Eurographics Association, 2007, S. 51–58
- [Che10] CHEN, Chaomei: Information visualization. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 2 (2010), Nr. 4, S. 387–403
- [CLS09] CORDS, Hilko ; LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun: Floating Labels: Improving Dynamics of Interactive Labeling Approaches. In: *Proceedings of IADIS Multi Conference on Computer Science and Information Systems (MCCSIS'09)*, IADIS, 2009, S. 235–238
- [Čmo08] ČMOLIK, Ladislav: Relational Transparency Model for Interactive Technical Illustration. In: *Proceedings of the International Symposium on Smart Graphics (SG'08)*, Springer, 2008, S. 263–270
- [Čmo11] ČMOLIK, Ladislav: *Interactive Illustrative Visualization of 3d Models*, Czech Technical University in Prague, Tschechische Republik, Diss., 2011
- [CMS95] CHRISTENSEN, Jon ; MARKS, Joe ; SHIEBER, Stuart: An Empirical Study of Algorithms for Point-Feature Label Placement. In: *ACM Transactions on Graphics* 14 (1995), Nr. 3, S. 203–232
- [CMS99] CARD, Stuard K. ; MACKINLAY, Jock ; SHNEIDERMAN, Ben: *Readings in Information Visualization: Using Vision To Think*. Morgan Kaufmann, 1999
- [CR98] CHI, Ed H. ; RIEDL, John: An Operator Interaction Framework for Visualization Systems. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'98)*, IEEE Computer Society, 1998, S. 63–70
- [CZQ⁺08] CUI, Weiwei ; ZHOU, Hong ; QU, Huamin ; WONG, Pak C. ; LI, Xiaoming: Geometry-Based Edge Clustering for Graph Visualization. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 14 (2008), Nr. 6, S. 1277–1284
- [Dec96] DECAUDIN, Philippe: Cartoon-Looking Rendering of 3D-Scenes / INRIA Rocquencourt, Frankreich. 1996 (2919). Forschungsbericht
- [DFRS03] DECARLO, Doug ; FINKELSTEIN, Adam ; RUSINKIEWICZ, Szymon ; SANTELLA, Anthony: Suggestive Contours for Conveying Shape. In: *ACM Transactions on Graphics* 22 (2003), Nr. 3, S. 848–855

- [DHOS00] DEUSSEN, Oliver ; HILLER, Stefan ; OVERVELD, Cornelius van ; STROTHOTTE, Thomas: Floating Points: A Method for Computing Stipple Drawings. In: *Computer Graphics Forum* 19 (2000), Nr. 3, S. 40–51
- [DI13] DEUSSEN, Oliver ; ISENBERG, Tobias: Halftoning and Stippling. In: ROSIN, Paul L. (Hrsg.) ; COLLOMOSSE, John (Hrsg.): *Image and Video-Based Artistic Stylisation*. Springer, 2013, S. 45–61
- [Die05] DIEPSTRATEN, Joachim: *Interactive Visualization Methods for Mobile Device Applications*, Universität Stuttgart, Deutschland, Diss., 2005
- [DiV13] DiVERDI, Stephen: A Brush Stroke Synthesis Toolbox. In: ROSIN, Paul L. (Hrsg.) ; COLLOMOSSE, John (Hrsg.): *Image and Video-Based Artistic Stylisation*. Springer, 2013, S. 23–44
- [DR07] DeCARLO, Doug ; RUSINKIEWICZ, Szymon: Highlight Lines for Conveying Shape. In: *Proceedings of the International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR'07)*, ACM Press, 2007, S. 63–70
- [DS91] DAY, Ross H. ; STECHER, Erica J.: Sine of an illusion. In: *Perception* 20 (1991), Nr. 1, S. 49–55
- [DWE02] DIEPSTRATEN, Joachim ; WEISKOPF, Daniel ; ERTL, Thomas: Transparency in Interactive Technical Illustrations. In: *Computer Graphics Forum* 21 (2002), Nr. 3, S. 317–325
- [DWE03] DIEPSTRATEN, Joachim ; WEISKOPF, Daniel ; ERTL, Thomas: Interactive Cutaway Illustrations. In: *Computer Graphics Forum* 22 (2003), Nr. 3, S. 523–532
- [EBRI09] EVERTS, Maarten H. ; BEKKER, Henk ; ROERDINK, Jos B. ; ISENBERG, Tobias: Depth-Dependent Halos: Illustrative Rendering of Dense Line Data. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 15 (2009), Nr. 6, S. 1299–1306
- [EBRI11] EVERTS, Maarten H. ; BEKKER, Henk ; ROERDINK, Jos B. ; ISENBERG, Tobias: Illustrative Line Styles for Flow Visualization. In: *Proceedings of the Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG'11)*, Eurographics Association, 2011, S. 105–110
- [ED06a] ELLIS, Geoffrey ; DIX, Alan: Enabling Automatic Clutter Reduction in Parallel Coordinate Plots. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12 (2006), Nr. 5, S. 717–724
- [ED06b] ELLIS, Geoffrey ; DIX, Alan: The Plot, the Clutter, the Sampling and its Lens: Occlusion Measures for Automatic Clutter Reduction. In: *Proceedings*

- of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI'06), ACM Press, 2006, S. 266–269
- [ED07] ELLIS, Geoffrey ; DIX, Alan: A Taxonomy of Clutter Reduction for Information Visualisation. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13 (2007), Nr. 6, S. 1216–1223
- [EDF08] ELMQVIST, Niklas ; DRAGICEVIC, Pierre ; FEKETE, Jean-Daniel: Rolling the Dice: Multidimensional Visual Exploration using Scatterplot Matrix Navigation. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 14 (2008), Nr. 6, S. 1141–1148
- [ER00] EBERT, David S. ; RHEINGANS, Penny: Volume Illustration: Non-Photorealistic Rendering of Volume Models. In: *Proceedings of IEEE Visualization (Vis'00)*, IEEE Computer Society, 2000, S. 195–202
- [ESB⁺06] EBERT, David S. ; SOUSA, Mario C. ; BRUCKNER, Stefan ; VIOLA, Ivan ; STREDNEY, Don ; ANDREWS, Bill ; SVAKHINE, Nikolai ; TIETJEN, Christian ; GOOCH, Bruce: *Illustrative Visualization for Medicine and Science*. Tutorial at IEEE Visualization (Vis'06), Oktober 2006
- [FDFH95] FOLEY, James D. ; DAM, Andries van ; FEINER, Steven K. ; HUGHES, John F.: *Computer Graphics: Principles and Practice*. Second Edition. Addison-Wesley, 1995
- [Few08] FEW, Stephen: *Solutions to the Problem of Over-Plotting in Graphs*. Perceptual Edge - Visual Business Intelligence Newsletter, September/Oktober 2008
- [FHHD05] FRITZSCHE, Lars-Peter ; HELLWIG, Heino ; HILLER, Stefan ; DEUSSEN, Oliver: Interactive design of authentic looking mosaics using Voronoi structures. In: *Proceedings of International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (VD'05)*, Bibliothek der Universität Konstanz, 2005, S. 1–11
- [FHS⁺12] FINK, Martin ; HAUNERT, Jan-Henrik ; SCHULZ, André ; SPOERHASE, Joachim ; WOLFF, Alexander: Algorithms for Labeling Focus Regions. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 18 (2012), Nr. 12, S. 2583–2592
- [FLH⁺06] FUCHS, Georg ; LUBOSCHIK, Martin ; HARTMANN, Knut ; ALI, Kamran ; STROTHOTTE, Thomas ; SCHUMANN, Heidrun: Adaptive Labeling for Interactive Mobile Information Systems. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualisation (IV'06)*, IEEE Computer Society, 2006, S. 453–459

- [FP99] FEKETE, Jean-Daniel ; PLAISANT, Catherine: Excentric Labeling: Dynamic Neighborhood Labeling for Data Visualization. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'99)*, ACM Press, 1999, S. 512–519
- [FP02] FEKETE, Jean-Daniel ; PLAISANT, Catherine: Interactive Information Visualization of a Million Items. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'02)*, IEEE Computer Society, 2002, S. 117–124
- [FP03] FEKETE, Jean-Daniel ; PLAISANT, Catherine: *Visualization and Pair Wise Comparison of Trees*. IEEE InfoVis'03 Contest, 2003
- [FS76] FLOYD, Robert W. ; STEINBERG, Louis: An Adaptive Algorithm for Spatial Greyscale. In: *Proceedings of the Society for Information Display* 17 (1976), Nr. 2, S. 75–77
- [Fuc02] FUCHS, Georg: *Intelligente Ikonenpositionierung auf der Karte*, Universität Rostock, Deutschland, Diplomarbeit, 2002
- [Fuc11] FUCHS, Georg: *Task-based Adaptation of Graphical Content in Smart Visual Interfaces*, Universität Rostock, Deutschland, Diss., 2011
- [Fur86] FURNAS, George W.: Generalized Fisheye Views. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'86)*, ACM Press, 1986, S. 16–23
- [GBKG04] GRIMM, Sören ; BRUCKNER, Stefan ; KANITSAR, Armin ; GRÖLLER, Eduard: Flexible Direct Multi-Volume Rendering in Interactive Scenes. In: *Proceedings of the Vision, Modeling, and Visualization Conference (VMV'04)*, Eurographics Association, 2004, S. 386–379
- [GG01] GOOCH, Bruce ; GOOCH, Amy: *Non-Photorealistic Rendering*. AK Peters Ltd, 2001
- [GHS06] GÖTZELMANN, Timo ; HARTMANN, Knut ; STROTHOTTE, Thomas: Contextual Grouping of Labels. In: *Proceedings of the Conference on Simulation and Visualization (SimVis'06)*, SCS Publishing House e.V., 2006, S. 245–258
- [GHS07] GÖTZELMANN, Timo ; HARTMANN, Knut ; STROTHOTTE, Thomas: Annotation of Animated 3D Objects. In: *Proceedings of the Conference on Simulation and Visualization (SimVis'07)*, SCS Publishing House e.V., 2007, S. 209–222
- [GI13] GERL, Moritz ; ISENBERG, Tobias: Interactive Example-based Hatching. In: *Computers & Graphics* 37 (2013), Nr. 1–2, S. 65–80

- [GK07] GANSNER, Emden R. ; KOREN, Yehuda: Improved Circular Layouts. In: *Proceedings of the International Symposium on Graph Drawing (GD'06)*, Springer, 2007, S. 386–398
- [Goo98] GOOCH, Amy: *Interactive Non-Photorealistic Technical Illustration*, University of Utah, Diplomarbeit, 1998
- [Göt08] GÖTZELMANN, Timo: *Correlating Illustrations and Text through Interactive Annotation*. VDM Verlag, 2008
- [GPE⁺05] GRÖLLER, Eduard ; PREIM, Bernhard ; EBERT, David S. ; BÜHLER, Katja ; HADWIGER, Markus ; VIOLA, Ivan: *Illustrative Visualization*. Tutorial at Eurographics'05, August 2005
- [GR04] GRIGORYAN, Gevorg ; RHEINGANS, Penny: Point-Based Probabilistic Surfaces to Show Surface Uncertainty. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 10 (2004), Nr. 5, S. 564–573
- [GST13] GLADISCH, Stefan ; SCHUMANN, Heidrun ; TOMINSKI, Christian: Navigation Recommendations for Exploring Hierarchical Graphs. In: *Proceedings of the International Symposium on Visual Computing (ISVC'13)*, Springer, 2013, S. 36–47
- [HA00] HELLER, Steven ; ARISMAN, Marshall: *The Education of an Illustrator*. Allworth Press, 2000
- [HA06] HEER, Jeffrey ; AGRAWALA, Maneesh: Software Design Patterns for Information Visualization. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12 (2006), Nr. 5, S. 853–860
- [Hau01] HAUSNER, Alejo: Simulating Decorative Mosaics. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'01)*, ACM Press, 2001, S. 573–580
- [Hau05] HAUSER, Helwig: Generalizing Focus+Context Visualization. In: BONNEAU, Georges-Pierre (Hrsg.) ; ERTL, Thomas (Hrsg.) ; NIELSON, Gregory M. (Hrsg.): *Scientific Visualization: The Visual Extraction of Knowledge from Data*. Springer, 2005, S. 305–327
- [HBG⁺12] HEINZL, Christoph ; BRUCKNER, Stefan ; GRÖLLER, Eduard ; PANG, Alex T. ; HEGE, Hans-Christian ; POTTER, Kristi ; WESTERMANN, Rüdiger ; MÖLLER, Torsten: *Uncertainty and Parameter Space Analysis in Visualization*. Tutorial at IEEE VisWeek'12, Oktober 2012
- [HBG13] HEINZL, Christoph (Hrsg.) ; BRUCKNER, Stefan (Hrsg.) ; GRÖLLER, Eduard (Hrsg.): Special Section on Uncertainty and Parameter Space Analysis in Visualization. In: *Computers & Graphics* - (2013), Nr. -, S. –

- [HBP⁺07] HUANG, Jingshu ; BUE, Brian ; PATTATH, Avin ; EBERT, David S. ; THOMAS, Krystal M.: Interactive Illustrative Rendering on Mobile Devices. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 27 (2007), Nr. 3, S. 48–56
- [HDM98] HERMAN, Ivan ; DELEST, Maylis ; MELANCON, Guy: Tree Visualisation and Navigation Clues for Information Visualisation / CWI Amsterdam, Niederlande. 1998 (INS-R9806). Forschungsbericht
- [HE12] HEALEY, Christopher G. ; ENNS, James T.: Attention and Visual Memory in Visualization and Computer Graphics. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 18 (2012), Nr. 7, S. 1170–1188
- [Hea01] HEALEY, Christopher G.: Formalizing Artistic Techniques and Scientific Visualization for Painted Renditions of Complex Information Spaces. In: *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann, 2001, S. 371–376
- [Her98] HERTZMANN, Aaron: Painterly Rendering with Curved Brush Strokes of Multiple Sizes. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'98)*, ACM Press, 1998, S. 453–460
- [Her03] HERTZMANN, Aaron: Tutorial: A Survey of Stroke-Based Rendering. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 23 (2003), Nr. 4, S. 70–81
- [HHN00] HAVRE, Susan ; HETZLER, Beth ; NOWELL, Lucy: ThemeRiver: Visualizing Theme Changes over Time. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'00)*, IEEE Computer Society, 2000, S. 115–123
- [HIR⁺03] HALPER, Nick ; ISENBERG, Tobias ; RITTER, Felix ; FREUDENBERG, Bert ; MERUVIA, Oscar ; SCHLECHTWEG, Stefan ; STROTHOTTE, Thomas: OpenNPAR: A System for Developing, Programming, and Designing Non-Photorealistic Animation and Rendering. In: *Proceedings of the Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG'03)*, 2003, S. 424–428
- [HLW93] HSU, Siu C. ; LEE, Irene H. ; WISEMAN, Neil E.: Skeletal Strokes. In: *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'93)*, ACM Press, 1993, S. 197–206
- [HM90] HABER, Robert B. ; MCNABB, David A.: Visualization Idioms: A Conceptual Model for Scientific Visualization Systems. In: NIELSON, Gregory M. (Hrsg.) ; SHRIVER, Bruce (Hrsg.) ; ROSENBLUM, Lawrence J. (Hrsg.): *Visualization in Scientific Computing*. IEEE Computer Society, 1990, S. 74–93

- [HMCM09] HSU, Wei-Hsien ; MEI, Jianqiang ; CORREA, Carlos D. ; MA, Kwan-Liu: Depicting Time Evolving Flow with Illustrative Visualization Techniques. In: *Proceedings of International Conference on Arts and Technology (ArtsIT'09)*, Springer, 2009, S. 136–147
- [Hod03] HODGES, Elaine R. S.: *The Guild Handbook of Scientific Illustration*. Second Edition. Wiley & Sons, 2003
- [Hol06] HOLTEN, Danny: Hierarchical Edge Bundles: Visualization of Adjacency Relations in Hierarchical Data. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12 (2006), Nr. 5, S. 741–748
- [HSKIH07] HAGH-SHENAS, Haleh ; KIM, Sunghee ; INTERRANTE, Victoria ; HEALEY, Christopher: Weaving Versus Blending: A Quantitative Assessment of the Information Carrying Capacities of Two Alternative Methods for Conveying Multivariate Data with Color. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13 (2007), Nr. 6, S. 1270–1277
- [HTER04] HEALEY, Christopher G. ; TATEOSIAN, Laura ; ENNS, James T. ; REMPLE, Mark: Perceptually-Based Brush Strokes for Nonphotorealistic Visualization. In: *ACM Transactions on Graphics* 23 (2004), Nr. 1, S. 64–96
- [HW09] HOLTEN, Danny ; WIJK, Jarke J.: Force-Directed Edge Bundling for Graph Visualization. In: *Proceedings of Eurographics / IEEE-VGTC Symposium on Visualization (EuroVis'09)*, Eurographics Association, 2009, S. 983–990
- [HZ00] HERTZMANN, Aaron ; ZORIN, Denis: Illustrating Smooth Surfaces. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'00)*, ACM Press, 2000, S. 517–526
- [IB06] ISENBERG, Tobias ; BRENNECKE, Angela: G-Strokes: A Concept for Simplifying Line Stylization. In: *Computers & Graphics* 30 (2006), Nr. 5, S. 754–766
- [IG97] INTERRANTE, Victoria ; GROSCH, Chester: Strategies for Effectively Visualizing 3D Flow with Volume LIC. In: *Proceedings of IEEE Visualization (Vis'97)*, IEEE Computer Society, 1997, S. 421–425
- [Imh75] IMHOF, Eduard: Positioning Names on Maps. In: *The American Cartographer* 2 (1975), Nr. 2, S. 128–144
- [Int97] INTERRANTE, Victoria: Illustrating Surface Shape in Volume Data via Principal Direction-Driven 3D Line Integral Convolution. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'97)*, ACM Press, 1997, S. 109–116

- [Ise13] ISENBERG, Tobias: Visual Abstraction and Stylisation of Maps. In: *The Cartographic Journal* 50 (2013), Nr. 18, S. 8–18
- [JP11] JOHNSON, Chris ; PANG, Alex: *Working with Uncertainty Workshop: Representation, Quantification, Propagation, Visualization, and Communication of Uncertainty*. Workshop at IEEE VisWeek'11, Oktober 2011
- [KCODL06] KOPF, Johannes ; COHEN-OR, Daniel ; DEUSSEN, Oliver ; LISCHINSKI, Dani: Recursive Wang Tiles for Real-Time Blue Noise. In: *ACM Transactions on Graphics* 25 (2006), Nr. 3, S. 509–518
- [Kei96] KEIM, Daniel A.: Pixel-Oriented Visualization Techniques for Exploring Very Large Databases. In: *Journal of Computational and Graphical Statistics* 5 (1996), Nr. 1, S. 58–77
- [Kei00] KEIM, Daniel A.: Designing Pixel-Oriented Visualization Techniques: Theory and Applications. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 6 (2000), Nr. 1, S. 59–78
- [KHG09] KNÖDEL, Sebastian ; HACHET, Martin ; GUITTON, Pascal: Interactive Generation and Modification of Cutaway Illustrations for Polygonal Models. In: *Proceedings of the International Symposium on Smart Graphics (SG'09)*, Springer, 2009, S. 140–151
- [KMI⁺09] KIM, Sung Y. ; MACIEJEWSKI, Ross ; ISENBERG, Tobias ; ANDREWS, William M. ; CHEN, Wei ; SOUSA, Mario C. ; EBERT, David S.: Stippling by Example. In: *Proceedings of the International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR'09)*, ACM Press, 2009, S. 41–50
- [KMM⁺13] KIM, SungYe ; MACIEJEWSKI, Ross ; MALIK, Abish ; EBERT, David S. ; ISENBERG, Tobias: Bristle Maps: A Multivariate Abstraction Technique for Geovisualization. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 19 (2013), Nr. 9, S. 1438–1454
- [KMSZ06] KEIM, Daniel A. ; MANSMANN, Florian ; SCHNEIDEWIND, Jorn ; ZIEGLER, Hartmut: Challenges in Visual Data Analysis. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualisation (IV'06)*, IEEE Computer Society, 2006, S. 9–16
- [Kos01] KOSARA, Robert: *Semantic Depth of Field - Using Blur for Focus + Context Visualization*, Technische Universität Wien, Österreich, Diss., 2001
- [KS00] KANG, Hyunmo ; SHNEIDERMAN, Ben: Visualization Methods for Personal Photo Collections: Browsing and Searching in the PhotoFinder. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME2000)*, IEEE Computer Society, 2000, S. 1539 –1542

- [KS06] KUSTANOWITZ, Jack ; SHNEIDERMAN, Ben: Hierarchical Layouts for Photo Libraries. In: *IEEE Multimedia* 13 (2006), Nr. 4, S. 62–72
- [KSL⁺08] KIM, Dongyeon ; SON, Minjung ; LEE, Yunjin ; KANG, Henry ; LEE, Seungyong: Feature-guided Image Stippling. In: *Computer Graphics Forum* 27 (2008), Nr. 4, S. 1209–1216
- [KT96] KAKOULIS, Konstantinos G. ; TOLLIS, Ioannis G.: On the Edge Label Placement Problem. In: *Proceedings of the International Symposium on Graph Drawing (GD'96)*, 1996, S. 241–256
- [KTS09] KALKOFEN, Denis ; TATZGERN, Markus ; SCHMALSTIEG, Dieter: Explosion Diagrams in Augmented Reality. In: *Proceedings of IEEE Virtual Reality (VR'09)*, IEEE Computer Society, 2009, S. 71–78
- [LAB⁺09] LAMMARSCH, Tim ; AIGNER, Wolfgang ; BERTONE, Alessio ; GÄRTNER, Johannes ; MAYR, Eva ; MIKSCH, Silvia ; SMUC, Michael: Hierarchical Temporal Patterns and Interactive Aggregated Views for Pixel-based Visualizations. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualisation (IV'09)*, IEEE Computer Society, 2009, S. 44–50
- [LACS08] LI, Wilmot ; AGRAWALA, Maneesh ; CURLESS, Brian ; SALESIN, David: Automated Generation of Interactive 3D Exploded View Diagrams. In: *ACM Transactions on Graphics* 27 (2008), Nr. 3, S. 1–7
- [Lam08] LAM, Heidi: A Framework of Interaction Costs in Information Visualization. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 14 (2008), Nr. 6, S. 1149–1156
- [LAS04] LI, Wilmot ; AGRAWALA, Maneesh ; SALESIN, David: Interactive Image-Based Exploded View Diagrams. In: *Proceedings of the Conference on Graphics Interface (GI'04)*, Canadian Human-Computer Communications Society, 2004, S. 203–212
- [LCD06] LUFT, Thomas ; COLDITZ, Carsten ; DEUSSEN, Oliver: Image Enhancement by Unsharp Masking The Depth Buffer. In: *ACM Transactions on Graphics* 25 (2006), Nr. 3, S. 1206–1213
- [LGH⁺09] LAIDLAW, David ; GILJA, Odd H. ; HANSEN, William H. ; GIERTSEN, Christopher ; GRÖLLER, Eduard: *Application of Illustrative Visualization in Medicine, Earth Science, and Oil & Gas Exploration and Production*. Panel at IllustraVis'09, Juni 2009
- [LH10] LIANG, Jie ; HUANG, Mao L.: Highlighting in Information Visualization: A Survey. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualisation (IV'10)*, IEEE Computer Society, 2010, S. 79–85

- [Li08] LI, Wilmot W.: *Interactive Illustrations for Visualizing Complex 3D Objects*, University of Washington, USA, Diss., 2008
- [LKL06] LEE, Hyunjun ; KWON, Sungtae ; LEE, Seungyong: Real-Time Pencil Rendering. In: *Proceedings of the International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR'06)*, ACM Press, 2006, S. 37–45
- [LKZ09] LIN, Xia (Hrsg.) ; KERREN, Andreas (Hrsg.) ; ZHANG, Jiaje (Hrsg.): Special Issue on Human-Centered Information Visualization. In: *Information Visualization* 8 (2009), Nr. 3, S. 137–238
- [Llo82] LLOYD, Stuart P.: Least Squares Quantization in PCM. In: *IEEE Transactions on Information Theory* 28 (1982), Nr. 2, S. 129–137
- [LM10] LI, Hua ; MOULD, David: Contrast-Aware Halftoning. In: *Computer Graphics Forum* 29 (2010), Nr. 2, S. 273–280
- [LM11] LI, Hua ; MOULD, David: Structure-Preserving Stippling by Priority-Based Error Diffusion. In: *Proceedings of Graphics Interface (GI'11)*, Canadian Human-Computer Communications Society, 2011, S. 127–134
- [LMP13] LAWONN, Kai ; MÖNCH, Tobias ; PREIM, Bernhard: Streamlines for Illustrative Real-time Rendering. In: *Computer Graphics Forum* 32 (2013), Nr. 3, S. 321–330
- [LMS⁺12] LUBOSCHIK, Martin ; MAUS, Carsten ; SCHULZ, Hans-Jörg ; SCHUMANN, Heidrun ; UHRMACHER, Adelinde M.: Heterogeneity-based Guidance for Exploring Multiscale Data in Systems Biology. In: *Proceedings of the 2nd IEEE Symposium on Biological Data Visualization (BioVis'12)*, IEEE Computer Society, 2012, S. 33–40
- [LMT⁺03] LU, Aidong ; MORRIS, Christopher J. ; TAYLOR, Joe ; EBERT, David S. ; HANSEN, Charles ; RHEINGANS, Penny ; HARTNER, Mark: Illustrative Interactive Stipple Rendering. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 9 (2003), Nr. 2, S. 127–138
- [LRA⁺07] LI, Wilmot ; RITTER, Lincoln ; AGRAWALA, Maneesh ; CURLESS, Brian ; SALESIN, David: Interactive Cutaway Illustrations of Complex 3D Models. In: *ACM Transactions on Graphics* 26 (2007), Nr. 3, S. 1–31
- [LRE⁺12] LUBOSCHIK, Martin ; RYBACKI, Stefan ; EWALD, Roland ; SCHWARZE, Benjamin ; SCHUMANN, Heidrun ; UHRMACHER, Adelinde M.: Interactive Visual Exploration of Simulator Accuracy: A Case Study for Stochastic Simulation Algorithms. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC'2012)*, IEEE Computer Society, 2012, S. 419:1–419:12

-
- [LRHS14] LUBOSCHIK, Martin ; RYBACKI, Stefan ; HAACK, Fiete ; SCHULZ, Hans-Jörg: Supporting the Integrated Visual Analysis of Input Parameters and Simulation Trajectories. In: *Computers & Graphics* 39 (2014), S. 37–47
- [LRS10a] LUBOSCHIK, Martin ; RADLOFF, Axel ; SCHUMANN, Heidrun: A new Weaving Technique for Handling Overlapping Regions. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI'10)*, ACM Press, 2010, S. 25–32
- [LRS10b] LUBOSCHIK, Martin ; RADLOFF, Axel ; SCHUMANN, Heidrun: *Using Non-Photorealistic Rendering Techniques for the Visualization of Uncertainty*. IEEE Information Visualization (InfoVis'10) Poster, 2010
- [LS07a] LI, Liya ; SHEN, Han-Wei: Image-Based Streamline Generation and Rendering. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13 (2007), Nr. 3, S. 630–640
- [LS07b] LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun: Explode to Explain – Illustrative Information Visualization. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualisation (IV'07)*, IEEE Computer Society, 2007, S. 301–307
- [LS08a] LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun: Discovering the Covered: Ghost-Views in Information Visualization. In: *Proceedings of the 16th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG'08)*, UNION Agency, 2008, S. 113–118
- [LS08b] LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun: Illustrative Halos in Information Visualization. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI'08)*, ACM Press, 2008, S. 384–387
- [LSC08] LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun ; CORDS, Hilko: Particle-Based Labeling: Fast Point-Feature Labeling without Obscuring Other Visual Features. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 14 (2008), Nr. 6, S. 1237–1244
- [LSST11] LEHMANN, Anke ; SCHUMANN, Heidrun ; STAADT, Oliver ; TOMINSKI, Christian: Physical Navigation to Support Graph Exploration on a Large High-Resolution Display. In: *Proceedings of the International Symposium on Visual Computing (ISVC'11)*, Springer, 2011, S. 496–507
- [LTB⁺12] LUBOSCHIK, Martin ; TOMINSKI, Christian ; BITTIG, Arne T. ; UHRMÄCHER, Adelinde M. ; SCHUMANN, Heidrun: Towards Interactive Visual Analysis of Microscopic-Level Simulation Data. In: *Proceedings of SIGRAD 2012 - Interactive Visual Analysis of Data*, Linköping University Electronic Press, 2012, S. 91–94

- [Lub05] LUBOSCHIK, Martin: *Anwendung kartographischer Beschriftungsprinzipien und -methoden in der Informationsvisualisierung*, Universität Rostock, Deutschland, Diplomarbeit, 2005
- [LZP⁺12] LIU, Shixia ; ZHOU, Michelle X. ; PAN, Shimei ; SONG, Yangqiu ; QIAN, Weihong ; CAI, Weijia ; LIAN, Xiaoxiao: TIARA: Interactive, Topic-Based Visual Text Summarization and Analysis. In: *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology* 3 (2012), Nr. 2, S. 25:1–25:28
- [Mac86] MACKINLAY, Jock: Automating the Design of Graphical Presentations of Relational Information. In: *ACM Transactions on Graphics* 5 (1986), Nr. 2, S. 110–141
- [Mac92] MACEACHREN, Alan M.: Visualizing Uncertain Information. In: *Cartographic Perspectives* 13 (1992), S. 10–19
- [MALI10] MARTÍN, Domingo ; ARROYO, Germán ; LUZÓN, M. V. ; ISENBERG, Tobias: Example-Based Stippling Using a Scale-Dependent Grayscale Process. In: *Proceedings of the International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR'10)*, ACM Press, 2010, S. 51–61
- [Mas01] MASUCH, Maic: *Nicht-photorealistische Visualisierungen: Von Bildern zu Animationen*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland, Diss., 2001
- [MBDK13] MASON, Jennifer S. ; BLEISCH, Susanne ; DUCKHAM, Matt ; KLIPPEL, Alexander: *Visually-Supported Reasoning with Uncertainty Workshop*. Workshop at the Conference on Spatial Information Theory (COSIT'13), September 2013
- [MFGJ08] MOTA, João ; FONSECA, Manuel J. ; GONÇALVES, Daniel ; JORGE, Joaquim A.: Agrafo: A Visual Interface for Grouping and Browsing Digital Photos. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI'08)*, ACM Press, 2008, S. 494–495
- [MM08] McDONNELL, Kevin T. ; MUELLER, Klaus: Illustrative Parallel Coordinates. In: *Computer Graphics Forum* 27 (2008), Nr. 3, S. 1031–1038
- [Mot07] MOTE, Kevin: Fast point-feature label placement for dynamic visualizations. In: *Information Visualization* 6 (2007), Nr. 4, S. 249–260
- [Mou07] MOULD, David: Stipple Placement using Distance in a Weighted Graph. In: *Proceedings of the Eurographics conference on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging*, Eurographics Association, 2007, S. 45–52

- [MS91] MARKS, Joe ; SHIEBER, Stuart: The Computational Complexity of Cartographic Label Placement / Harvard University, USA. 1991 (TR-05-91). Forschungsbericht
- [MTB03] MCGUFFIN, Michael J. ; TANCAU, Liviu ; BALAKRISHNAN, Ravin: Using Deformations for Browsing Volumetric Data. In: *Proceedings of IEEE Visualization (Vis'03)*, IEEE Computer Society, 2003, S. 401–408
- [MTHG03] MATTAUSCH, Oliver ; THEUSSL, Thomas ; HAUSER, Helwig ; GRÖLLER, Eduard: Strategies for Interactive Exploration of 3D Flow Using Evenly-spaced Illuminated Streamlines. In: *Proceedings of the Spring Conference on Computer Graphics (SCCG'03)*, ACM Press, 2003, S. 213–222
- [Mun09a] MUNZNER, Tamara: A Nested Model for Visualization Design and Validation. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 15 (2009), Nr. 6, S. 921–928
- [Mun09b] MUNZNER, Tamara: Visualization. In: SHIRLEY, Peter (Hrsg.) ; MARSCHNER, Steve (Hrsg.): *Fundamentals of Computer Graphics*. Third Edition. Taylor & Francis Ltd, 2009, S. 675–707
- [New06] NEWMAN, Mark E. J.: Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices. In: *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 74 (2006), Nr. 3, S. 036104
- [NHAH03] NIEDERAUER, Christopher ; HOUSTON, Mike ; AGRAWALA, Maneesh ; HUMPHREYS, Greg: Non-Invasive Interactive Visualization of Dynamic Architectural Environments. In: *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics (SI3D'03)*, ACM Press, 2003, S. 55–58
- [Nie12] NIEDERMANN, Benjamin: *Consistent Labeling of Dynamic Maps Using Smooth Trajectories*, Universität Karlsruhe, Deutschland, Diplomarbeit, 2012
- [OA10] OKE, Oloruntegbe K. ; ALAM, Gazi M.: Comparative evaluation of the effectiveness of 2 and 3D visualizations in students' understanding of structures of organic molecules. In: *International Journal of Physical Sciences* 5 (2010), Nr. 5, S. 605–611
- [OH95] OSTROMOUKHOV, Victor ; HERSCH, Roger D.: Artistic Screening. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'95)*, ACM Press, 1995, S. 219–228
- [OJS⁺11] OELKE, Daniela ; JANETZKO, Halldor ; SIMON, Svenja ; NEUHAUS, Klaus ; KEIM, Daniel A.: Visual Boosting in Pixel-based Visualizations. In: *Computer Graphics Forum* 30 (2011), Nr. 3, S. 871–880

- [Ost01] OSTROMOUKHOV, Victor: A Simple and Efficient Error-Diffusion Algorithm. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'01)*, ACM Press, 2001, S. 567–572
- [Pet03] PETZOLD, Ingo: *Beschriftung von Bildschirmkarten in Echtzeit – Konzept Und Struktur*, Universität Bonn, Deutschland, Diss., 2003
- [PGP03] PETZOLD, Ingo ; GRÖGER, Gerhard ; PLÜMER, Lutz: Fast Screen Map Labeling – Data-Structures and Algorithms. In: *Proceedings of the International Cartographic Conference (ICC'03)*, 2003, S. 288–298
- [PHMF01] PRAUN, Emil ; HOPPE, Hugues ; MATTHEW ; FINKELSTEIN, Adam: Real-Time Hatching. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'01)*, ACM Press, 2001, S. 581–587
- [Poe94] POETTER, Godehard: *Die Anleitung zur Anleitung : Leitfaden zur Erstellung technischer Dokumentationen*. Vogel Buchverlag, 1994
- [PPBT12] PIRINGER, Harald ; PAJER, Stephan ; BERGER, Wolfgang ; TEICHMANN, Heike: Comparative Visual Analysis of 2D Function Ensembles. In: *Computer Graphics Forum* 31 (2012), Nr. 3, S. 1195–1204
- [PQW⁺08] PANG, Wai-Man ; QU, Yingge ; WONG, Tien-Tsin ; COHEN-OR, Daniel ; HENG, Pheng-Ann: Structure-Aware Halftoning. In: *ACM Transactions on Graphics* 27 (2008), Nr. 3, S. 89:1–89:8
- [PW09] PRETORIUS, A. J. ; WIJK., Jarke J. V.: What does the user want to see?: What do the data want to be? In: *Information Visualization* 8 (2009), Nr. 3, S. 153–166
- [PW10] PAULSEN, Friedrich ; WASCHKE, Jens: *Sobotta, Atlas der Anatomie des Menschen*. 23. Auflage. Elsevier, Urban & Fischer, 2010
- [PWL97] PANG, Alex T. ; WITTENBRINK, Craig M. ; LODHA, Suresh K.: Approaches to Uncertainty Visualization. In: *The Visual Computer* 13 (1997), Nr. 8, S. 370–390
- [PXY⁺05] PHAN, Doantam ; XIAO, Ling ; YEH, Ron ; HANRAHAN, Pat ; WINOGRAD, Terry: Flow Map Layout. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'05)*, IEEE Computer Society, 2005, S. 29–34
- [Rai98] RAIDL, Günther: A Genetic Algorithm for Labeling Point Features. In: *Proceedings of the International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology*, 1998, S. 189–196
- [RBDN05] ROY, Sasanka ; BHATTACHARJEE, Subhasis ; DAS, Sandip ; NANDY, Subhas C.: A Fast Algorithm for Point Labeling Problem. In: *Proceedings of the*

- 17th Canadian Conference on Computational Geometry (CCCG'05)*, 2005, S. 155–158
- [RBG08] RAUTEK, Peter ; BRUCKNER, Stefan ; GRÖLLER, Eduard: Interaction-Dependent Semantics for Illustrative Volume Rendering. In: *Computer Graphics Forum* 27 (2008), Nr. 3, S. 847–854
- [RBGV08] RAUTEK, Peter ; BRUCKNER, Stefan ; GRÖLLER, Eduard ; VIOLA, Ivan: Illustrative Visualization: New Technology or Useless Tautology? In: *SIGGRAPH Computer Graphics* 42 (2008), Nr. 3, S. 4:1–4:8
- [RC13] ROSIN, Paul L. (Hrsg.) ; COLLOMOSSE, John (Hrsg.): *Image and Video-Based Artistic Stylisation*. Springer, 2013
- [RF94] ROBERTSON, Philip K. ; FERRARI, Lisa de: Systematic Approaches to Visualization: Is a Reference Model Needed? In: ROSENBLUM, Lawrence J. (Hrsg.) ; ENSHAW, Rae A. (Hrsg.) ; ENCARNACÃO, José L. (Hrsg.) ; HAGEN, Hans (Hrsg.) ; KAUFMAN, Arie E. (Hrsg.) ; KLIMENKO, Stanislav V. (Hrsg.) ; NIELSON, Gregory M. (Hrsg.) ; POST, Frits H. (Hrsg.) ; THALMANN, Daniel (Hrsg.): *Scientific Visualization: Advances and Challenges*. Academic Press, 1994, S. 287–308
- [RLMJ05] ROSENHOLTZ, Ruth ; LI, Yuanzhen ; MANSFIELD, Jonathan ; JIN, Zhenlan: Feature Congestion: A Measure of Display Clutter. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'05)*, 2005, S. 761–770
- [RLN07] ROSENHOLTZ, Ruth ; LI, Yuanzhen ; NAKANO, Lisa: Measuring Visual Clutter. In: *Journal of Vision* 7 (2007), Nr. 2, S. 1–22
- [RLTS08] ROSENBAUM, Rene ; LUBOSCHIK, Martin ; THIEDE, Conrad ; SCHUMANN, Heidrun: Progressive Information Presentation. In: *Poster Compendium of IEEE Information Visualization (InfoVis'08)*, IEEE Computer Society, 2008, S. 98–99
- [RVB⁺08] RUIZ, Marc ; VIOLA, Ivan ; BOADA, Imma ; BRUCKNER, Stefan ; FEIXAS, Miquel ; SBERT, Mateu: Similarity-Based Exploded Views. In: *Proceedings of the International Symposium on Smart Graphics (SG'08)*, Springer, 2008, S. 154–165
- [SABS94] SALISBURY, Michael P. ; ANDERSON, Sean E. ; BARZEL, Ronen ; SALESIN, David H.: Interactive Pen-and-Ink Illustration. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'94)*, ACM Press, 1994, S. 101–108

- [SB04] SANTOS, Selan dos ; BRODLIE, Ken: Gaining understanding of multivariate and multidimensional data through visualization. In: *Computers & Graphics* 28 (2004), Nr. 3, S. 311–325
- [SBD06] SHNEIDERMAN, Ben ; BEDERSON, Benjamin B. ; DRUCKER, Steven M.: Find That Photo!: Interface Strategies to Annotate, Browse, and Share. In: *Communications of the ACM* 49 (2006), Nr. 4, S. 69–71
- [Sch07] SCHLECHTWEG, Stefan: *Informationsdarstellung mit Bildern*. Habilitationsschrift, Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Germany, 2007
- [SCK10] SCHROEDER, David ; COFFEY, Dane ; KEEFE, Daniel F.: Drawing with the Flow: A Sketch-Based Interface for Illustrative Visualization of 2D Vector Fields. In: *Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Sketch-Based Interfaces and Modeling (SBIM'10)*, 2010, S. 49–56
- [SCS04] SONNET, Henry ; CARPENDALE, Sheelagh ; STROTHOTTE, Thomas: Integrating Expanding Annotations with a 3D Explosion Probe. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI'04)*, ACM Press, 2004, S. 63–70
- [SE03] SVAKHINE, Nikolai A. ; EBERT, David S.: Interactive Volume Illustration and Feature Halos. In: *Proceedings of the Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG'03)*, IEEE Computer Society, 2003, S. 347–354
- [Sec02] SECORD, Adrian: Weighted Voronoi Stippling. In: *Proceedings of the International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR'02)*, ACM Press, 2002, S. 37–43
- [SFCP12] SIGG, Stephan ; FUCHS, Raphael ; CARNECKY, Robert ; PEIKERT, Ronald: Intelligent Cutaway Illustrations. In: *Proceedings of the IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis'12)*, IEEE Computer Society, 2012, S. 185–192
- [SGS05a] SCHLECHTWEG, Stefan ; GERMER, Tobias ; STROTHOTTE, Thomas: RenderBots – Multi-Agent Systems for Direct Image Generation. In: *Computer Graphics Forum* 24 (2005), Nr. 2, S. 137–148
- [SGS05b] STOLL, Carsten ; GUMHOLD, Stefan ; SEIDEL, Hans-Peter: Visualization with stylized line primitives. In: *Proceedings of IEEE Visualization (Vis'05)*, IEEE Computer Society, 2005, S. 695–702
- [Shn92] SHNEIDERMAN, Ben: Tree visualization with tree-maps: A 2-d space-filling approach. In: *ACM Transactions on Graphics* 11 (1992), Nr. 1, S. 92–99

- [Shn96] SHNEIDERMAN, Ben: The Eyes Have It: A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualizations / Department of Computer Science, Human-Computer Interaction Laboratory and Institute for Systems Research, University of Maryland, USA. 1996 (CS-TR-3665). Forschungsbericht
- [SHS11a] SCHULZ, Hans-Jörg ; HADLAK, Steffen ; SCHUMANN, Heidrun: The Design Space of Implicit Hierarchy Visualization: A Survey. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 17 (2011), Nr. 4, S. 393–411
- [SHS11b] SCHULZ, Hans-Jörg ; HADLAK, Steffen ; SCHUMANN, Heidrun: Point-Based Visualization for Large Hierarchies. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 17 (2011), Nr. 5, S. 598–611
- [SJEG05] SVAKHINE, Nikolai A. ; JANG, Yun ; EBERT, David ; GAITHER, Kelly: Illustration and Photography-Inspired Visualization of Flows and Volumes. In: *Proceedings of IEEE Visualization (Vis'05)*, IEEE Computer Society, 2005, S. 687–694
- [SM00] SCHUMANN, Heidrun ; MÜLLER, Wolfgang: *Visualisierung - Grundlagen und allgemeine Methoden*. Springer, 2000
- [Sma91] SMALL, David: Simulating Watercolor by Modelling Diffusion, Pigment, and Paper Fibers. In: *SPIE Proceedings - Image Handling and Reproduction Systems Integration*, SPIE Press, 1991, S. 140–146
- [SMI99] STROTHOTTE, Thomas ; MASUCH, Maic ; ISENBERG, Tobias: Visualizing Knowledge about Virtual Reconstructions of Ancient Architecture. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics (CGI'99)*, IEEE Computer Society, 1999, S. 36–43
- [SNLH09] SIPS, Mike ; NEUBERT, Boris ; LEWIS, John P. ; HANRAHAN, Pat: Selecting Good Views of High-Dimensional Data Using Class Consistency. In: *Computer Graphics Forum* 28 (2009), Nr. 3, S. 831–838
- [SS02] STROTHOTTE, Thomas ; SCHLECHTWEIG, Stefan: *Non-Photorealistic Computer Graphics. Modelling, Rendering and Animation*. Morgan Kaufmann, 2002
- [SSLR96] SCHUMANN, Jutta ; STROTHOTTE, Thomas ; LASER, Stefan ; RAAB, Andreas: Assessing the Effect of Non-Photorealistic Rendered Images in CAD. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'96)*, ACM Press, 1996, S. 35–41
- [SSM11] SILVA, Samuel ; SANTOS, Beatriz S. ; MADEIRA, Joaquim: Using color in visualization: A survey. In: *Computers & Graphics* 35 (2011), Nr. 2, S. 320–333

- [ST90] SAITO, Takafumi ; TAKAHASHI, Tokiichiro: Comprehensible Rendering of 3-D Shapes. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'90)*, ACM Press, 1990, S. 197–206
- [Str86] STRASSMANN, Steve: Hairy Brushes. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'86)*, ACM Press, 1986, S. 225–232
- [Str98] STROTHOTTE, Thomas: *Computational Visualization: Graphics, Abstraction and Interactivity*. Springer, 1998
- [SWHS97] SALISBURY, Michael P. ; WONG, Michael T. ; HUGHES, John F. ; SALESIN, David H.: Orientable Textures for Image-Based Pen-and-Ink Illustration. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'97)*, ACM Press, 1997, S. 401–406
- [SZ00] STASKO, John ; ZHANG, Eugene: Focus+Context Display and Navigation Techniques for Enhancing Radial, Space-Filling Hierarchy Visualizations. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'00)*, IEEE Computer Society, 2000, S. 57–65
- [TAE⁺09] TATU, Andrada ; ALBUQUERQUE, Georgia ; EISEMANN, Martin ; SCHNEIDWIND, Jörn ; THEISEL, Holger ; MAGNORK, Marcus ; KEIM, Daniel: Combining automated analysis and visualization techniques for effective exploration of high-dimensional data. In: *Proceedings of IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology (VAST'09)*, IEEE Computer Society, 2009, S. 59–66
- [TB96] TURK, Greg ; BANKS, David: Image-Guided Streamline Placement. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'96)*, ACM Press, 1996, S. 453–460
- [TBK⁺12] THOM, Dennis ; BOSCH, Harald ; KOCH, Steffen ; WORNER, Michael ; ERTL, Thomas: Spatiotemporal Anomaly Detection through Visual Analysis of Geolocated Twitter Messages. In: *Proceedings of the IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis'12)*, IEEE Computer Society, 2012, S. 41–48
- [TFS08a] THIEDE, Conrad ; FUCHS, Georg ; SCHUMANN, Heidrun: Smart Lenses. In: *Proceedings of the International Symposium on Smart Graphics (SG'08)*, Springer, 2008, S. 178–189
- [TFS08b] TOMINSKI, Christian ; FUCHS, Georg ; SCHUMANN, Heidrun: Task-Driven Color Coding. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualisation (IV'08)*, IEEE Computer Society, 2008, S. 373–380

- [THE07] TATEOSIAN, Laura G. ; HEALEY, Christopher G. ; ENNS, James T.: Engaging Viewers Through Nonphotorealistic Visualizations. In: *Proceedings of the International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR'07)*, ACM Press, 2007, S. 93–102
- [Tie07] TIECHENG, Liu: Probabilistic Error Diffusion For Image Enhancement. In: *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 53 (2007), Nr. 2, S. 528–534
- [TIP05] TIETJEN, Christian ; ISENBERG, Tobias ; PREIM, Bernhard: Combining Silhouettes, Shading, and Volume Rendering for Surgery Education and Planning. In: *Proceedings of Eurographics / IEEE-VGTC Symposium on Visualization (EuroVis'05)*, Eurographics Association, 2005, S. 303–310
- [TK98] THEISEL, Holger ; KREUSELER, Matthias: An Enhanced Spring Model for Information Visualization. In: *Computer Graphics Forum* 17 (1998), Nr. 3, S. 335–344
- [TKAM06] TORY, Melanie ; KIRKPATRICK, Arthur E. ; ATKINS, M. S. ; MÖLLER, Tors-ten: Visualization Task Performance with 2D, 3D, and Combination Displays. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12 (2006), Nr. 1, S. 2–13
- [TKS10] TATZGERN, Markus ; KALKOFEN, Denis ; SCHMALSTIEG, Dieter: Compact Explosion Diagrams. In: *Proceedings of the International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR'10)*, ACM Press, 2010, S. 17–26
- [TKS11] TATZGERN, Markus ; KALKOFEN, Denis ; SCHMALSTIEG, Dieter: Multi-Perspective Compact Explosion Diagrams. In: *Computers & Graphics* 35 (2011), Nr. 1, S. 135–147
- [TON03] TANAKA, Yoichi ; OKADA, Yoshihiro ; NIJIMA, Koichi: Treecube: Visualization Tool for Browsing 3D Multimedia Data. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualisation (IV'03)*, IEEE Computer Society, 2003, S. 427–432
- [TSAA12] TOMINSKI, Christian ; SCHUMANN, Heidrun ; ANDRIENKO, Gennady ; ANDRIENKO, Natalia: Stacking-Based Visualization of Trajectory Attribute Data. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 18 (2012), Nr. 12, S. 2565–2574
- [Tuf01] TUFTE, Edward R.: *The Visual Display of Quantitative Information*. Second Edition. Graphics Press, 2001
- [UIM⁺03] URNESS, Timothy ; INTERRANTE, Victoria ; MARUSIC, Ivan ; LONGMI-RE, Ellen ; GANAPATHISUBRAMANI, Bharathram: Effectively Visualizing

- Multi-Valued Flow Data using Color and Texture. In: *Proceedings of IEEE Visualization (Vis'03)*, IEEE Computer Society, 2003, S. 115–121
- [Uli00] ULICHNEY, Robert: A Review of Halftoning Techniques. In: *SPIE Proceedings - Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts V*, SPIE Press, 2000, S. 378–391
- [VB99] VEREVKA, Oleg ; BUCHANAN, John W.: Halftoning with Image-Based Dither Screens. In: *Proceedings of the Conference on Graphics Interface (GI'99)*, Morgan Kaufmann, 1999, S. 167–174
- [VB00] VERYOVKA, Oleg ; BUCHANAN, John: Texture-based Dither Matrices. In: *Computer Graphics Forum* 19 (2000), Nr. 1, S. 51–64
- [VBS⁺07] VIOLA, Ivan ; BRUCKNER, Stefan ; SOUSA, Mario C. ; EBERT, David S. ; CORREA, Carlos D.: *Illustrative Display and Interaction in Visualization*. Tutorial at IEEE Visualization (Vis'07), Oktober 2007
- [VG05] VIOLA, Ivan ; GRÖLLER, Eduard: Smart Visibility in Visualization. In: *Proceedings of Eurographics Workshop on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging (CA'05)*, 2005, S. 209–216
- [VGB⁺05] VIOLA, Ivan ; GRÖLLER, Eduard ; BÜHLER, Katja ; HADWIGER, Markus ; PREIM, Bernhard ; EBERT, David S. ; SOUSA, Mario C. ; STREDNEY, Don: *Illustrative Visualization*. Tutorial at IEEE Visualization (Vis'05), Oktober 2005
- [VHE10] VIOLA, Ivan ; HAUSER, Helwig ; EBERT, David: Special Section on Illustrative Visualization. In: *Computers & Graphics* 34 (2010), Nr. 4, S. 335–408
- [Vir08] VIRTEL, Erik: *Illustrative Strokes in linienbasierten Visualisierungstechniken*. Universität Rostock, Deutschland, Studienarbeit, 2008
- [VKG05] VIOLA, Ivan ; KANITSAR, Armin ; GRÖLLER, Eduard: Importance-Driven Feature Enhancement in Volume Visualization. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 11 (2005), Nr. 4, S. 408–418
- [VTW12] VAARANIEMI, Mikael ; TREIB, Marc ; WESTERMANN, Rüdiger: Temporally Coherent Real-Time Labeling of Dynamic Scenes. In: *Proceedings of the International Conference on Computing for Geospatial Research and Applications (COM.Geo'12)*, ACM Press, 2012, S. 17:1–17:10
- [VWL06] VLIENEN, Roel ; WIJK, Jarke J. V. ; LINDEN, Erik-Jan van d.: Visualizing Business Data with Generalized Treemaps. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12 (2006), Nr. 5, S. 789–796

- [Wat05] WATTENBERG, Martin: A Note on Space-Filling Visualizations and Space-Filling Curves. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'05)*, IEEE Computer Society, 2005, S. 181–186
- [WB04] WALDECK, Carsten ; BALFANZ, Dirk: Mobile Liquid 2D Scatter Space. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualisation (IV'04)*, IEEE Computer Society, 2004, S. 494–498
- [WF03] WATTENBERG, Martin ; FISHER, Danyel: A Model of Multi-Scale Perceptual Organization in Information Graphics. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'03)*, IEEE Computer Society, 2003, S. 23–30
- [WGM⁺08] WANG, Lujin ; GIESEN, Joachim ; MCDONNELL, Kevin T. ; ZOLLIKER, Peter ; MUELLER, Klaus: Color Design for Illustrative Visualization. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 14 (2008), Nr. 6, S. 1739–1754
- [Wig07] WIGAN, Mark: *Visuelles Denken: Vom Text zum Bild. Eine Einführung für Illustratoren*. Stiebner, 2007
- [WII⁺12] WOOD, Jo ; ISENBERG, Petra ; ISENBERG, Tobias ; DYKES, Jason ; BOUKHELIFA, Nadia ; SLINGSBY, Aidan: Sketchy Rendering for Information Visualization. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 18 (2012), Nr. 12, S. 2749–2758
- [Wil96] WILLS, Graham J.: Selection: 524,288 Ways to Say »This is Interesting«. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'96)*, IEEE Computer Society, 1996, S. 54–60
- [WJK06] WATERS, Chris ; JANKUN-KELLY, T. J.: Illustrative Rendering for Information Visualization. In: *Poster Compendium of IEEE Information Visualization (InfoVis'06)*, IEEE Computer Society, 2006, S. 42–43
- [Woo94] WOOD, Phyllis: *Scientific Illustration: A Guide to Biological, Zoological, and Medical Rendering Techniques, Design, Printing, and Display*. Wiley & Sons, 1994
- [WPFH02] WEBB, Matthew ; PRAUN, Emil ; FINKELSTEIN, Adam ; HOPPE, Hugues: Fine Tone Control in Hardware Hatching. In: *Proceedings of the International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR'02)*, ACM Press, 2002, S. 53–59
- [WS94] WINKENBACH, Georges ; SALESIN, David H.: Computer-Generated Pen-and-Ink Illustration. In: *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'94)*, ACM Press, 1994, S. 91–100

- [WS09] WOLFF, Alexander ; STRIJK, Tycho: *The Map-Labeling Bibliography*. <http://i11www.iti.uni-karlsruhe.de/map-labeling/bibliography/>, 2009. – (Zugriff: 03.05.2013)
- [WY04] WARD, Matthew O. ; YANG, Jing: Interaction Spaces in Data and Information Visualization. In: *Proceedings of Eurographics / IEEE TCVG Symposium on Visualization (VisSym'04)*, Eurographics Association, 2004, S. 137–145
- [XDC⁺13] XU, Panpan ; DU, Fan ; CAO, Nan ; SHI, Conglei ; ZHOU, Hong ; QU, Huamin: Visual Analysis of Set Relations in a Graph. In: *Computer Graphics Forum* 32 (2013), Nr. 3, S. 61–70
- [YKM12] YANG, Heekyung ; KWON, Yunmi ; MIN, Kyungha: A Stylized Approach for Pencil Drawing from Photographs. In: *Computer Graphics Forum* 31 (2012), Nr. 4, S. 1471–1480
- [YKSJ07] YI, Ji S. ; KANG, Youn ah ; TASKO, John ; JACKO, Julie A.: Toward a Deeper Understanding of the Role of Interaction in Information Visualization. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13 (2007), Nr. 6, S. 1224–1231
- [YL05] YAMAMOTO, Missae ; LORENA, Luiz Antonio N.: A Constructive Genetic Approach to Point-Feature Cartographic Label Placement. In: IBARAKI, Toshihide (Hrsg.) ; NONOBE, Koji (Hrsg.) ; YAGIURA, Mutsunori (Hrsg.): *Metaheuristics: Progress as Real Problem Solvers*. Springer, 2005, S. 285–300
- [YM12] YANG, Heekyung ; MIN, Kyungha: Simulation of Color Pencil Drawing using LIC. In: *KSI Transactions on Internet and Information Systems* 6 (2012), Nr. 12, S. 3296–3314
- [Yoe72] YOELI, Pinhas: The Logic of Automated Map Lettering. In: *The Cartographic Journal* 9 (1972), S. 99–108
- [Zha13] ZHANG, Eugene: NPR for Traditional Artistic Genres. In: ROSIN, Paul L. (Hrsg.) ; COLLOMOSSE, John (Hrsg.): *Image and Video-Based Artistic Stylisation*. Springer, 2013, S. 103–121
- [ZISS04] ZANDER, Johannes ; ISENBERG, Tobias ; SCHLECHTWEG, Stefan ; STROTHOTTE, Thomas: High Quality Hatching. In: *Computer Graphics Forum* 23 (2004), Nr. 3, S. 421–430
- [ZYQ⁺08] ZHOU, Hong ; YUAN, Xiaoru ; QU, Huamin ; CUI, Weiwei ; CHEN, Baoquan: Visual Clustering in Parallel Coordinates. In: *Proceedings of Eurographics / IEEE-VGTC Symposium on Visualization (EuroVis'08)*, Eurographics Association, 2008, S. 1047–1054

- [ZZXZ09] ZENG, Kun ; ZHAO, Mingtian ; XIONG, Caiming ; ZHU, Song-Chun: From Image Parsing to Painterly Rendering. In: *ACM Transactions on Graphics* 29 (2009), Nr. 1, S. 2:1–2:11

Liste der wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Fachvorträge

Begutachtete Zeitschriftenartikel

LUBOSCHIK, Martin ; RYBACKI, Stefan ; HAACK, Fiete ; SCHULZ, Hans-Jörg: Supporting the Integrated Visual Analysis of Input Parameters and Simulation Trajectories. In: *Computers & Graphics* 39 (2014), S. 37–47.

LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun ; CORDS, Hilko: Particle-Based Labeling: Fast Point-Feature Labeling without Obscuring Other Visual Features. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG)* 14 (2008), Nr. 6, S. 1237–1244.*

Begutachtete Konferenzbeiträge

HELMS, Tobias ; LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun ; UHRMACHER, Adelinde M.: An Approximate Execution of Rule-Based Multi-level Models. In: *Proceedings of the International Conference on Computational Methods in Systems Biology (CMSB'2013)*, Springer, 2013, S. 19–32.

LUBOSCHIK, Martin ; RYBACKI, Stefan ; EWALD, Roland ; SCHWARZE, Benjamin ; SCHUMANN, Heidrun ; UHRMACHER, Adelinde M.: Interactive Visual Exploration of Simulator Accuracy: A Case Study for Stochastic Simulation Algorithms. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC'2012)*, IEEE Computer Society, 2012, S. 419:1–419:12.*

LUBOSCHIK, Martin ; MAUS, Carsten ; SCHULZ, Hans-Jörg ; SCHUMANN, Heidrun ; UHRMACHER, Adelinde M.: Heterogeneity-based Guidance for Exploring Multiscale Data in Systems Biology. In: *Proceedings of the 2nd IEEE Symposium on Biological Data Visualization (BioVis'12)*, IEEE Computer Society, 2012, S. 33–40.

LUBOSCHIK, Martin ; TOMINSKI, Christian ; BITTIG, Arne T. ; UHRMACHER, Adelinde M. ; SCHUMANN, Heidrun: Towards Interactive Visual Analysis of Microscopic-Level Simulation Data. In: *Proceedings of the Annual SIGRAD Conference, Special Theme: Interactive Visual Analysis of Data*, Linköping University Electronic Press, 2012, S. 91–94.*

- RADLOFF, Axel ; LUBOSCHIK, Martin ; SIPS, Mike ; SCHUMANN, Heidrun: Supporting Display Scalability by Redundant Mapping. In: *Proceedings of Advances in Visual Computing - International Symposium on Visual Computing (ISVC'11)*, Springer, 2011, S. 472–483.
- RADLOFF, Axel ; LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun: Smart Views in Smart Environments. In: *Proceedings of the International Symposium on Smart Graphics (SG'11)*, Springer, 2011, S. 1–12.
- LUBOSCHIK, Martin ; RADLOFF, Axel ; SCHUMANN, Heidrun: A new Weaving Technique for Handling Overlapping Regions. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI'10)*, ACM Press, 2010, S. 25–32.*
- CORDS, Hilko ; LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun: Floating Labels: Improving Dynamics of Interactive Labeling Approaches. In: *Proceedings of the IADIS Multi Conference on Computer Science and Information Systems (MCCSIS'09)*, IADIS, 2009, S. 235–238.
- LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun: Illustrative Halos in Information Visualization. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI'08)*, ACM Press, 2008, S. 384–387.*
- LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun: Discovering the Covered: Ghost-Views in Information Visualization. In: *Proceedings of the 16th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG'08)*, UNION Agency, S. 113–118.*
- LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun: Explode to Explain – Illustrative Information Visualization. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualization (IV'07)*, IEEE Computer Society, 2007, S. 301–307.*
- FUCHS, Georg ; LUBOSCHIK, Martin ; HARTMANN, Knut ; ALI, Kamran ; SCHUMANN, Heidrun ; STROTHOTTE, Thomas: Adaptive Labeling for Interactive Mobile Information Systems. In: *Proceedings of the International Conference Information Visualization (IV'06)*, IEEE Computer Society, 2006, S. 453–459.

Begutachtete sonstige Beiträge

- LUBOSCHIK, Martin ; RADLOFF, Axel ; SCHUMANN, Heidrun: Using Non-Photorealistic Rendering Techniques for the Visualization of Uncertainty. *IEEE Information Visualization (InfoVis'10) Poster*, 2010.

*Mit Fachvortrag.

-
- ROSENBAUM, René ; LUBOSCHIK, Martin ; THIEDE, Conrad ; SCHUMANN, Heidrun: Progressive Information Presentation. In: *Poster Compendium of IEEE Information Visualization (InfoVis'08)*, IEEE Computer Society, 2008, S. 98–99.
- SCHULZ, Hans-Jörg ; LUBOSCHIK, Martin ; SCHUMANN, Heidrun: Exploration of the 3D Treemap Design Space. In: *Poster Compendium of IEEE Information Visualization (InfoVis'07)*, IEEE Computer Society, 2007, S. 78–79.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die eingereichte Dissertation selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Diese Arbeit hat noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen.

.....
Martin Luboschik

Rostock, 2. November 2013

Thesen

1. Ziel der Informationsvisualisierung ist es, Bilder zu erzeugen, die die Charakteristika einer Datenmenge visuell veranschaulichen. Durch wachsende Datenmengen und die steigende Komplexität der Daten wird es jedoch zunehmend schwerer, visuelle Repräsentationen zu erzeugen, die dem Nutzer eine einfache Interpretation seiner Daten erlauben. Insbesondere kommt es bei großen Datenmengen zu gegenseitigen Überlagerungen und dem Vermischen von Informationen – dem so bezeichneten *Visual Clutter*.
2. Die Illustration adressiert als Anwendungsgebiet des Nicht-photorealistischen Renderings (NPR) ganz gezielt die Kommunikation wichtiger Bildinformationen. Entsprechende Techniken sind teilweise seit Jahrhunderten etabliert und stehen heute auch als Softwarelösungen zur Verfügung. Illustrationen werden derzeit erfolgreich in der Volumen- und Strömungsvisualisierung eingesetzt. Dagegen werden sie in der Informationsvisualisierung bisher nur vereinzelt genutzt.
3. Für die Informationsvisualisierung und das NPR existieren etablierte Modelle, die jeweils eine abstrakte Beschreibung der jeweiligen Vorgehensweisen ermöglichen. Eine systematische Untersuchung auf Basis dieser Modelle zeigt, dass sich NPR-Verfahren und Verfahren der Informationsvisualisierung verschneiden lassen, dass aber aufgrund modellgebener Beschränkungen eine vollständige Integration nicht möglich ist.
4. Das aus diesen Untersuchungen abgeleitete erweiterte Data-State-Referenzmodell beschreibt konzeptuell die Verzahnung beider Modelle. Auf diese Weise wird eine theoretische Grundlage für die illustrative Informationsvisualisierung geschaffen, die prinzipiell die Nutzung beliebiger NPR-Verfahren aus allen NPR-Bereichen (Bildmanipulationen, zusätzliche Grafikprimitive, Modellmanipulationen, zusätzliche Transformationen) in der Informationsvisualisierung erlaubt. Bereits existierende, aber auch im Rahmen der Arbeit neu entwickelte illustrative Ansätze lassen sich in dieses Modell einordnen.
5. Im Rahmen der Illustration werden Bildmanipulationen üblicherweise zur Hervorhebung und Deakzentuierung ausgewählter Daten eingesetzt. In der vorliegenden Dissertation werden sie darüber hinaus auch zur Darstellung von Unsicherheiten genutzt. Außerdem werden Bildmanipulationen eingesetzt, um Überlagerungen in der visuellen Repräsentation zu behandeln.

6. Zusätzliche Grafikprimitive wie *Strokes* oder Beschriftungen stellen in dieser Dissertation zusätzliche Informationen für die Interpretation der Daten bereit. So können auch durch eine Variation der *Stroke*-Parameter zusätzlich zu den Daten Unsicherheiten kommuniziert werden. Beschriftungen erhöhen die Aussagekraft einer Darstellung, aber nur dann, wenn sie lesbar sind und sie die Interpretation der eigentlichen Visualisierung nicht beeinflussen. Entsprechend entwickelte Verfahren zeigen, dass eine solche überlagerungsfreie Beschriftung auch für sehr große Datenmengen und in hoch interaktiven Umgebungen möglich ist.
7. Das im Visualisierungsprozess erzeugte geometrische Modell lässt sich über Modellmanipulationen verändern. Die entwickelten Phantom- und Explosionszeichnungen modifizieren die Sichtbarkeit und die Positionen visueller Repräsentanten. Hierdurch werden ausgewählte Informationen gezielt freigelegt. Darüber hinaus bringen Explosionszeichnungen zusätzliche Informationen in die visuelle Repräsentation ein, die nicht nur die Interpretation der Daten sondern auch das Verständnis der Visualisierungstechnik fördern können.
8. Zusätzliche Transformationen sind ein integraler Bestandteil der Bilderzeugung im NPR. So sind sie auch ein integraler Bestandteil der illustrativen Informationsvisualisierung und kommen bei allen entwickelten Ansätzen zum Einsatz.
9. Die entwickelten Verfahren verwenden, wie im NPR üblich, überwiegend *G-Buffer* als neutrale Datenstruktur. Dies führt zu einer großen Flexibilität hinsichtlich der Anwendbarkeit und erlaubt den breiten Einsatz der neuen Techniken in der Informationsvisualisierung; so etwa auch in aktuellen Forschungsprojekten zur Veranschaulichung des Zusammenspiels von Parametern, Daten und Unsicherheiten.